



**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**

RAINY ALVES DE SOUSA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM DA BIOMASSA
CASCA DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus*) NA REMOÇÃO DE
GASOLINA EM CORPOS D'ÁGUA, UTILIZANDO O SISTEMA DE
ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL**

**SUMÉ - PB
2019**

RAINY ALVES DE SOUSA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM DA BIOMASSA
CASCA DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus*) NA REMOÇÃO DE
GASOLINA EM CORPOS D'ÁGUA, UTILIZANDO O SISTEMA DE
ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

Orientadora: Professora. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima.

**SUMÉ - PB
2019**

S725e

Sousa, Rainy Alves de.

Estudo da influência do processo de secagem da biomassa casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*) na remoção de gasolina em corpos d'água, utilizando o sistema de adsorção em leito diferencial. / Rainy alves de Sousa. - 2021.

46 f.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. 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 sistema de leito diferencial. 2. Cinética de adsorção. 3. Tratamento de efluentes. 4. Palma forrageira – casca. 5. Águas contaminadas – recuperação. 6. Biomassa – secagem. 7. Leito diferencial. 8. Gasolina – remoção em corpos d'água. I. Lima, Lenilde Mérgia Ribeiro. II. Título.

CDU: 60 (043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

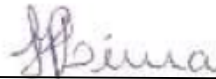
Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

RAINY ALVES DE SOUSA

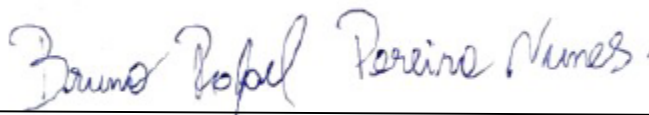
**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SECAGEM DA BIOMASSA
CASCA DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus*) NA REMOÇÃO DE
GASOLINA EM CORPOS D'ÁGUA, UTILIZANDO O SISTEMA DE
ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos.

BANCA EXAMINADORA:



Professora Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima.
Orientadora – UAEB/CDSA/UFCG



Professor Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes.
Examinador interno – UAEB/CDSA/UFCG



Professor Dr. George do Nascimento Ribeiro.
Examinador interno – UAEB/CDSA/UFCG

Trabalho aprovado em: 07 de junho de 2021.

SUMÉ - PB

À minha mãe, minha inspiração, exemplo de mulher guerreira e dona de um coração cheio de bondade. Sou grata por ter vivido este sonho comigo tão intensamente. A realização deste sonho, dedico a você, minha rainha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, que me permitiu vivenciar essa extraordinária experiência. Agradeço pelo dom da vida, pela coragem e saúde para seguir sempre em frente e saber que a única alternativa que temos é não desistir. Gratidão, Senhor, por tudo.

Aos meus pais, minha base, Maria José e Reginaldo Lopes; em especial, à minha mãe, por ter sonhado esse sonho juntamente comigo, estando presente em todo o percurso desta longa caminhada. Sou grata a Deus por tê-los em minha vida e por tudo que me proporcionaram.

Aos meus irmãos Cinthya, Isac e Vitória. Eu amo vocês, sou grata por todos os momentos juntos e apoio sempre. À minha sobrinha linda, Maria Clara, presente de Deus que encheu minha vida de amor.

Aos meus familiares, primos, primas, tias, tios, avós, obrigada por acreditarem em mim e por compartilharem esse sonho comigo. Em especial, agradeço à minha avó Ana Alves (*in memoriam*) por toda força, palavras de apoio e incentivo.

À minha excelente orientadora, Profa. Dra. Lenilde Mérgia Ribeiro Lima, pela confiança, pelas orientações durante o PIBIC e o Trabalho de Conclusão de Curso, estando sempre presente. Agradeço pela paciência, competência, pelos conhecimentos compartilhados e pela amizade. A tenho como inspiração.

Grato aos queridos professores da UAEB; em especial, Bruno Rafael, Jean César, Franklin Nóbrega, Glauciane Coelho, Aldre Jorge, Ana Verônica e Mérgia Ribeiro. Agradeço muito a professores de outras unidades do CDSA, como Aldinete Barreto, Fabiana Pimentel, Morgana Fabíola, Patrício José, Faustino Teatino, Nahum Isaque, Alecksandra Vieira, Paulo Medeiros, Leide Alencar e Ilza Maria. Agradeço a todos que acompanharam minha graduação e me ajudaram a crescer como profissional e ser humano.

Aos meus amigos “Anormais”, Andreza, Dayse, Kamila e Caio. Os queridos e únicos da minha turma de 2015.1, Emanuelle, Marco, Davi e Tácia, também em especial a Rebeca. Obrigada por todos os momentos que passamos juntos, por todo o amor, paciência, companhia, risadas, farras e palhaçadas. Vocês são o presente que Sumé me deu.

Ao meu namorado Kaique, que acompanhou essa minha jornada, só tenho a agradecer pelo amor, compreensão, amizade e por ter vivenciado este sonho comigo.

À minha amiga Camila Rafaela, uma irmã de outra mãe, um presente de Deus na minha vida que contribuiu na minha trajetória, com companheirismo e amizade verdadeira, sempre estando presente em todos os momentos, dividindo desde as preocupações até as conquistas. Agradeço por tudo, por mesmo distante hoje, estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amigos que se tornaram minha família nesses cinco anos, aqueles que fizeram e fazem parte da Residência Universitária, agradeço a ajuda, acolhimento e companheirismo de um com o outro. Aquelas mais próximas como colegas de quarto, Regina, Kamila, Marcelle, ainda amigos como Mônica, Micilene, Cíntia, Isaak, Luzia, Danielly, Dayse, Shirley, Raissa, entre tantos outros. Agradeço a absolutamente todos que naquele espaço se fizeram presentes no papel de família.

Agradeço à GAE e todas as pessoas que a compõem e garantem a assistência adequada para que possamos realizar nosso sonho de cursar um ensino superior. Obrigada, Rogério, Tanielzy, Rivaldo, Vânia e Laís.

À professora Dra. Adriana de Fátima Meira Vital, coordenadora do LASOL (Laboratório de Solos) do CDSA, pela disponibilização do espaço para a realização dos experimentos.

Ao técnico Danilson Correia da Silva, do LASOL, pela ajuda concedida durante todo o trabalho experimental.

Aos colegas de curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos: Tácia Albuquerque, Isadora Guedes e Marina Brito pela colaboração e apoio na realização da pesquisa.

À banca examinadora, aos professores Dr. Bruno Rafael Pereira Nunes e Dr. George do Nascimento Ribeiro, pela disponibilidade de dividirem comigo seus conhecimentos neste momento tão importante.

A todos que acreditaram no meu potencial, pois depositaram forças no meu coração e a todos que duvidaram, pois me motivaram a provar o contrário.

*“O mundo está nas mãos daqueles que têm a
coragem de sonhar e de correr o risco de viver
seus sonho*

Paulo Coelho

RESUMO

Acidentes nas indústrias petrolíferas e em postos de combustíveis têm ocorrido com muita frequência, sucedendo a contaminação com compostos hidrogenocarbonados tanto em solos, como em sistemas aquáticos. Dentre as tecnologias disponíveis na recuperação de águas contaminadas com compostos derivados do petróleo, uma das mais utilizadas é a adsorção, processo baseado na capacidade que alguns sólidos possuem de remover substâncias solúveis. A busca por adsorventes de baixo custo tem apresentado as biomassas como opções atrativas e sustentáveis para o tratamento de diversos tipos de efluentes. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do processo de secagem da biomassa casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*), quando utilizada como bioadsorvente para remoção de contaminante hidrogenocarbonado (gasolina) em corpos d'água, utilizando sistema de adsorção em leito diferencial. A metodologia utilizada foi proposta por Lima *et al.* (2014). Inicialmente, houve a preparação das biomassas, as quais passaram por dois processos de secagem distintos: secagem convectiva em estufa à temperatura constante de 70 °C e secagem natural. Após o processo de secagem, as biomassas foram obtidas na forma particulada utilizando sistema de peneiras Série Tyler. Posteriormente, foram realizados os experimentos para o estudo da cinética de adsorção, em que foram avaliados os tempos de 05 a 60 minutos (com intervalos de 5 minutos) e o equilíbrio de adsorção, cujas concentrações de contaminantes variaram de 5 a 60% (com taxa de variação de 5%). Para o sistema de leito diferencial utilizaram-se concentrações de 5%, 7,5% e 10% de poluente. Os resultados confirmaram que a cinética de adsorção da gasolina foi rápida por meio da biomassa obtida nos diferentes métodos de secagem, apresentando influência pouco significativa entre os dois métodos utilizados. As isotermas de equilíbrio também apresentaram valores de capacidade máxima de adsorção próximos entre si, com valores máximos de 8,61 g.g⁻¹ e 8,67 g.g⁻¹ para a biomassa seca naturalmente e seca em estufa, respectivamente. No sistema de leito diferencial, as biomassas secas a diferentes temperaturas apresentaram eficiência no processo de adsorção; no entanto, a biomassa seca naturalmente resultou em um percentual máximo de adsorção para as concentrações de contaminante igual a 5% e 7,5%. Com isso, mediante os resultados obtidos, pode-se confirmar que a casca de palma forrageira obtida por meio dos dois processos de secagem apresenta-se como uma biomassa adsorvente para remoção de compostos derivados do petróleo presente em corpos d'água, sendo indicado utilizar a secagem em temperatura ambiente, visto que há um menor gasto de energia, resultando em uma melhor relação custo-benefício.

Palavras-chave: tratamento de efluentes; capacidade adsortiva; gasolina; temperaturas de secagem; palma forrageira.

SOUSA, R. A. de. **Study of influence of drying process of cactus pear forage (*Opuntia ficus*) biomass in removal of gasoline in water bodies, by differential bed adsorption system.** Graduation conclusion work (Biotechnology and Bioprocess Engineering), Federal University of Campina Grande, Sumé-PB, 2019.

ABSTRACT

Accidents in oil industry and gas stations have occurred very frequently, with contamination with hydrogen carbon compounds in both soil and aquatic systems. Among technologies available in recovery of waters contaminated with petroleum compounds, one of most used is adsorption, a process based on ability of some solids to remove soluble substances. Search for low cost adsorbents has presented biomass as attractive and sustainable options for treatment of various types of effluents. Therefore, objective of this work was to evaluate adsorptive efficiency of cactus pear forage palm bark biomass (*Opuntia ficus-indica*) obtained from two drying processes, when used to remove gasoline from water bodies using adsorption differential bed system. Methodology used was proposed by Lima *et al.* (2014). Initially, biomass was prepared in particulate form using Tyler Series sieves. Subsequently, experiments were performed to study adsorption kinetics, in which times from 05 to 60 minutes (with 5-minute intervals) and adsorption equilibrium were evaluated, whose contaminant concentrations ranged from 5 to 60% (with rate of change of 5%). For differential bed system concentrations of 5%, 7.5% and 10% of pollutant were used. Results confirmed that gasoline adsorption kinetics was fast through biomass obtained in different drying methods, with little influence. Equilibrium isotherms also showed maximum adsorption capacity values close to each other, with maximum values of 8.61 g.g⁻¹ and 8.67 g.g⁻¹ for naturally dried and oven dried biomass, respectively. In differential bed system, biomasses dried at different temperatures presented efficiency in adsorption process; However, naturally dry biomass resulted in a maximum percentage of adsorption at contaminant concentrations of 5% and 7.5%. Thus, it can be confirmed by results obtained that cactus pear forage bark obtained by two drying processes presents as an adsorbent biomass for removal of petroleum-derived compounds present in water bodies, being indicated drying at room temperature, as there is less energy expenditure, resulting in a better cost-benefit ratio.

Keywords: effluents treatment; adsorptive capacity; gasoline; drying temperatures; cactus pear forage.

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1	Cultivar de Palma Forrageira (<i>Opuntia ficus</i>).....	24
Fotografia 2	Cascas de palma forrageira (<i>Opuntia ficus</i>) dispostas em bandeja para posterior secagem natural.....	28
Fotografia 3	Cascas de palma forrageira (<i>Opuntia ficus</i>) dispostas em bandeja para secagem convectiva.....	29
Fotografia 4	(a) Maceração da biomassa e (b) classificação granulométrica.....	29
Fotografia 5	Frascos Erlenmeyer contendo a mistura água/gasolina/biomassa na mesa agitadora.....	30
Fotografia 6	Provetas com a solução final para análise volumétrica.....	31
Fotografia 7	(a) Recipiente contendo a mistura gasolina/água; (b) Biomassa particulada em espessura de 3 mm na tela de alumínio.....	32
Fotografia 8	Tela de alumínio sobreposta no recipiente de vidro contendo a mistura gasolina/água.....	33
Fotografia 9	Análise volumétrica da quantidade de gasolina adsorvida no processo...	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BTEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno
BTX	Benzeno, tolueno e xileno
ANP	Agência Nacional do Petróleo
COV	Compostos orgânicos voláteis
mg	Miligrama
kg	Quilograma
g	Gramma
L	Litro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
mL	Mililitro
PB	Paraíba
rpm	Rotação por minuto
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
CFR	Cooperative Fuel Research
q_e	Capacidade adsortiva do adsorvente
C₀	Concentrações iniciais
V	Volume
°C	Graus Celsius
pH	Potencial Hidrogeniônico
µg.L⁻¹	Microgramas por litro
n°	Número
%	Porcentagem
art.	Artigo
GAE	Gerência de Assistência Estudantil
UAEB	Unidade Acadêmica de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos
CDSA	Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1	POLUIÇÃO DAS ÁGUAS POR COMPOSTOS HIDROGENOCARBONADOS.....	15
3.2	HIDROCARBONETOS.....	16
3.2.1	Gasolina.....	17
3.3	ADSORÇÃO.....	18
3.3.1	Cinética de Adsorção.....	20
3.3.2	Equilíbrio de Adsorção.....	20
3.3.2.1	<i>Isoterma de Freundlich.....</i>	22
3.4	ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL.....	22
3.5	BIOMASSA ADSORVENTE.....	23
3.5.1	Palma Forrageira (<i>Opuntia ficus</i>).....	24
3.6	SECAGEM.....	25
4	MATERIAL E METODOLOGIA.....	27
4.1	MATERIAL.....	27
4.2	METODOLOGIA.....	27
4.2.1	Obtenção da biomassa seca.....	28
4.2.1.1	<i>Secagem natural.....</i>	28
4.2.1.2	<i>Secagem convectiva em estufa.....</i>	28
4.2.2	Obtenção da biomassa na forma particulada.....	29
4.2.3	Cinética de Adsorção.....	30
4.2.4	Equilíbrio na adsorção.....	30
4.2.5	Sistema de Adsorção em Leito Diferencial.....	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1	CINÉTICA DE ADSORÇÃO.....	35
5.2	EQUILÍBRIO NA ADSORÇÃO.....	36
5.3	ADSORÇÃO EM SISTEMA DE LEITO DIFERENCIAL.....	39
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento populacional e o consequente aumento das atividades industriais vêm contribuindo para o agravamento dos problemas ambientais, principalmente com respeito à preservação das águas superficiais e subterrâneas. Em função deste fato, a legislação vem se tornando cada vez mais restritiva e a fiscalização mais presente. Entretanto, relatos de despejos de toneladas de resíduos em córregos, rios e mares são ainda bastante frequentes em todo o mundo. Dessa forma, o tratamento e condicionamento da água potável, assim como a proteção ao meio ambiente, têm se tornado uma das principais preocupações mundiais (TAVARES, 2007; TIBURTIUS; ZAMORA; LEAL, 2004).

A indústria do petróleo é mundialmente reconhecida como uma das atividades econômicas com o maior potencial de impacto ao meio ambiente. Os eventuais derramamentos de petróleo, principalmente, após o desastre no Golfo do México em 2010, aumentaram a preocupação ambiental mundial no que diz respeito ao desenvolvimento de materiais e métodos que tenham a capacidade de remover, recuperar e degradar o óleo (CALDAS; VIANA; SANTOS, 2017).

Dentre as tecnologias desenvolvidas para a recuperação de águas residuárias, uma das mais utilizadas é a adsorção, a qual é baseada na capacidade que alguns sólidos possuem de remover substâncias solúveis. As moléculas ou íons que estão na fase aquosa, chamados adsorbatos, são adsorvidos na superfície de um sólido, chamado adsorvente (MEURER; SILVA, 2019).

A adsorção é um processo de separação e purificação de grande aplicação na indústria química, petroquímica e bioquímica. A descoberta e comercialização de novos materiais adsorventes conduziram ao desenvolvimento da adsorção como processo de separação. Assim, a técnica tornou-se uma opção válida para a remoção de poluentes diluídos em efluentes líquidos, bem como para a recuperação de componentes de alto valor agregado diluídos em correntes industriais (AMORIM, 2016).

O processo de adsorção tem comprovadamente se mostrado um método efetivo, com potencial para remoção de diversos poluentes, incluindo aqueles presentes em águas residuárias de indústrias petrolíferas. Dessa forma, é de grande importância a pesquisa e desenvolvimento de materiais adsorventes para o tratamento de água contaminada com petróleo e seus derivados (OLIVEIRA; SOUZA; SOUZA, 2019).

Atualmente, diversas fontes de adsorventes vêm sendo investigadas com a finalidade de serem utilizados para tratamento de água. No entanto, alguns dos adsorventes são de difícil

desenvolvimento e elevado custo, o que inviabiliza sua utilização em grande escala (OLADOJA *et al.*, 2017).

O processo de adsorção usando biomassas como adsorvente vem sendo uma alternativa potencialmente atrativa e econômica para o tratamento de diversos tipos de efluentes. O efeito de diversas biomassas vem sendo estudado no tratamento de águas contendo compostos orgânicos, como é o caso dos efluentes contaminados com derivados do petróleo (LIMA *et al.*, 2014; AMORIM, 2016; CARVALHO, 2014; OLIVEIRA, 2017; SOUSA; LIMA, 2019; LIMA *et al.*, 2018).

Em se tratando do semiárido Nordeste, há uma variedade de biomassas que podem ser obtidas a partir da sua vegetação típica, sendo de fácil coleta e baixo custo (SANTOS, SILVA; SRINIVASAN, 2007). Dentre as variedades encontradas no semiárido paraibano, a palma forrageira (*Opuntia ficus*) apresenta-se como alternativa de biomassa para utilização como adsorvente de contaminantes hidrogenocarbonados em corpos d'água.

O processo de adsorção em leito diferencial utilizando biomassas adsorventes, com o objetivo de aplicação em escala ampliada, no tratamento de resíduos industriais contaminados com compostos derivados do petróleo, como também na purificação de corpos d'água, usando biomassa a partir de plantas nativas da região Nordeste como adsorvente (SOUZA; LIMA; SILVA, 2011).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência adsortiva da casca da palma forrageira (*Opuntia ficus*) obtida por meio de dois processos de secagem distintos (secagem em estufa e secagem natural) quando empregada para remoção de gasolina presente em corpos d'água, utilizando o sistema de adsorção em leito diferencial.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do processo de secagem da biomassa casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*), quando utilizada como bioadsorvente para remoção de contaminante hidrocarbonado (gasolina) em corpos d'água, utilizando sistema de adsorção em leito diferencial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a secagem da biomassa casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*) a partir da secagem convectiva em estufa a 70°C e secagem natural;
- Obter as curvas cinéticas para a caracterização da dinâmica da adsorção da gasolina em contato com a palma;
- Estudar o poder adsortivo da palma quando colocada em contato com a gasolina, por meio das isothermas obtidas pela análise de equilíbrio;
- Submeter a mistura gasolina/água, juntamente com a biomassa palma forrageira ao processo de adsorção em leito diferencial.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 POLUIÇÃO DAS ÁGUAS POR COMPOSTOS HIDROGENOCARBONADOS

A poluição hídrica é o resultado da adição de resíduos no corpo d'água, que podem ser no formato de matéria ou energia, que ocasione alterações na qualidade, provocando danos aos seres vivos e ao meio ambiente, que dependem desse recurso para sobreviver, além de promover alterações nas características físico-químicas da água (SILVA, 2010).

A poluição interfere na integridade dos recursos naturais que conservam a vida na biosfera, afetando significativamente o meio ambiente. O descarte de produtos poluentes sem um tratamento adequado acaba violando o equilíbrio dos ecossistemas, destruindo sua capacidade de auto regulação e renovação. Estes dejetos são referidos como resíduos, os quais geralmente são resultantes de atividades humanas, seja num processo industrial ou no descarte de um produto industrializado (SILVA, 2010).

Os combustíveis fósseis, como a gasolina e o óleo diesel, sempre foram considerados a matriz energética mais importante utilizada em diferentes indústrias químicas e petroquímicas. Dessa forma, a crescente demanda por produtos derivados do petróleo vem ocasionando impactos ambientais negativos, como a poluição de reservatórios de água, por meio da operação e manutenção inadequada de equipamentos industriais (VARJANI, 2017).

Normalmente a maior parcela do processo de contaminação pode ser atribuída às atividades das refinarias, devido a vazamentos, derrames e acidentes durante o refinamento, transporte e operações de armazenamento do petróleo e seus derivados. Em casos de derramamento de combustíveis e vazamentos em tanques de estocagem, os principais contaminantes capazes de impactar o meio ambiente, oferecendo sérios riscos de poluição às fontes de água, são os hidrocarbonetos monoaromáticos, os denominados compostos BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) e os policíclicos aromáticos, como os naftalenos e benzopirenos, os quais são compostos muito tóxicos e apresentam caráter volátil (MARTINS, 2016; BENETTI, 2017).

Os BTEXs podem ser classificados como compostos orgânicos voláteis (COVs) por possuírem alta pressão de vapor e, ao entrarem em contato com a atmosfera, transformam-se em gás. Em razão disso, quando presentes na natureza provocam sérios problemas para a saúde humana, além da contaminação do meio ambiente no ar, na água e no solo. A sua poluição no ar contribui para o aquecimento global, visto que com a diminuição do ozônio estratosférico ocorre a formação do ozônio troposférico, que é um poluente altamente tóxico quando em

contato com os COVs (MACHADO *et al.*, 2015).

Acidentes nas indústrias petrolíferas e em postos de combustíveis têm ocorrido com muita frequência, sucedendo a contaminação com compostos hidrogenocarbonados tanto em solos, como em sistemas aquáticos. A contaminação de águas subterrâneas muitas vezes ocorre devido à presença dos BTEXs na gasolina. Estes compostos presentes na gasolina são pouco solúveis em água, estando na fase líquida quando em contato com o solo, sendo considerados como os principais contaminantes, pois são os primeiros a atingirem o lençol freático (LOPES, 2011; AMORIM, 2016).

No âmbito urbano brasileiro, os problemas ambientais se acumulam e refletem situações de riscos, com impactos progressivos na qualidade do ar, da água, dos solos e na saúde pública. O artigo 225 da Constituição Federal consagrou o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado como direito fundamental, criando o dever do agente degradador reparar os danos causados e estabeleceu o fundamento da responsabilização de agentes poluidores, pessoas físicas e jurídicas. A Portaria nº518 de Março de 2004 do Ministério da Saúde define que os valores máximos permitidos para os diferentes hidrocarbonetos monoaromáticos quanto à potabilidade da água são de: $5\mu\text{g.L}^{-1}$ para o benzeno, $170\mu\text{g.L}^{-1}$ para o tolueno, $200\mu\text{g.L}^{-1}$ para o etilbenzeno e $300\mu\text{g.L}^{-1}$ para o xileno (SION; GIOVANNI; MARIA, 2014; MARTINS, 2015).

3.2 HIDROCARBONETOS

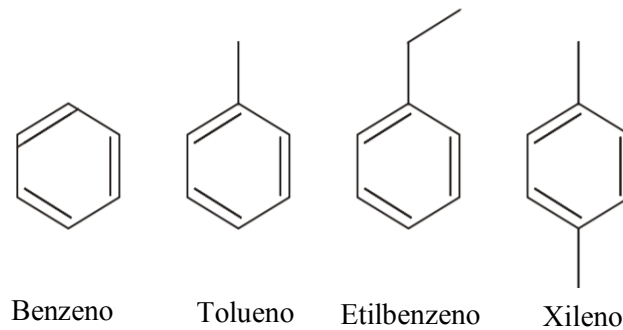
O petróleo é uma mistura complexa que contém vários compostos, sendo que os hidrocarbonetos representam a fração majoritária. De acordo com a sua origem, as suas composições químicas e as suas propriedades físicas variam de um campo petrolífero para outro. Devido, principalmente, à complexidade dessa mistura, normalmente o tratamento de áreas contaminadas por essas substâncias é bastante difícil e problemático (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

Os hidrocarbonetos são compostos orgânicos que contêm basicamente os elementos de carbono e hidrogênio em sua composição. A quase totalidade dos hidrocarbonetos que constituem o petróleo pertencem a quatro grupos ou famílias: os hidrocarbonetos parafínicos, os naftênicos, os aromáticos e os asfálticos (OLIVEIRA, 2017).

Os hidrocarbonetos aromáticos, tais como benzeno, tolueno, etilbenzeno e os isômeros do xileno (BTEX), representados na Figura 1, são alguns dos compostos orgânicos voláteis facilmente encontrados no petróleo bruto e seus derivados, como a gasolina, substância de

grande utilização como combustível e que se destaca como um dos principais contaminantes do solo e de águas subterrâneas (PENG *et al.*, 2015).

Figura 1 - Estrutura molecular dos compostos BTEX.



Fonte: <http://universechemistry.blogspot.com>, 2019.

A toxicidade de hidrocarbonetos é grandemente estudada, podendo-se destacar as características associadas à sua estrutura química e sua hidrofobicidade, ou seja, os hidrocarbonetos mais solúveis em água são menos tóxicos (SOUZA; LIMA; SILVA, 2011).

3.2.1 Gasolina

A gasolina é um dos diversos produtos que derivam do petróleo bruto, sendo suas características e especificações de seus componentes regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP). A gasolina automotiva consiste na mistura complexa de hidrocarbonetos derivados do petróleo, com números de carbono variando de 4 a 12 átomos e temperatura de ebulição entre 30 e 225 °C. Além dos hidrocarbonetos, a gasolina pode conter também compostos oxigenados, compostos de enxofre, compostos de nitrogênio e compostos metálicos, todos eles em baixas concentrações. Sua composição depende da sua utilização, origem e dos processos de refino do petróleo (SILVA *et al.*, 2009; CARVALHO, 2014).

No Brasil existem quatro tipos de gasolina: Gasolina A – não possui adição de álcool e é utilizada em motores CFR (Cooperative Fuel Research) para padronização de funcionamento de máquinas. É a gasolina produzida nas refinarias; Gasolina C – gasolina contendo álcool etílico, encontrada principalmente nas distribuidoras e postos de combustíveis; Gasolina Aditivada – gasolina comum na qual insere-se um aditivo, cuja principal finalidade é limpar o sistema de distribuição de combustível. Pode ser encontrada nas distribuidoras e postos de combustíveis; Gasolina Premium ou Podium (alta octanagem) – possui adição de álcool etílico

em sua composição. Possui um maior teor de hidrocarbonetos aromáticos e isoparafínicos em relação à gasolina comum (CÔCCO, 2008).

Segundo Tiburtius, Zamora e Leal (2004), o maior problema da contaminação por intermédio da gasolina está relacionado à existência dos hidrocarbonetos aromáticos, dentre os quais se destacam benzeno, tolueno e xilenos (BTX). Os compostos aromáticos BTX totalizam cerca de 10 a 59% da gasolina, enquanto os hidrocarbonetos alifáticos compreendem 41 a 62%, sendo os hidrocarbonetos aromáticos geralmente mais tóxicos do que os compostos alifáticos.

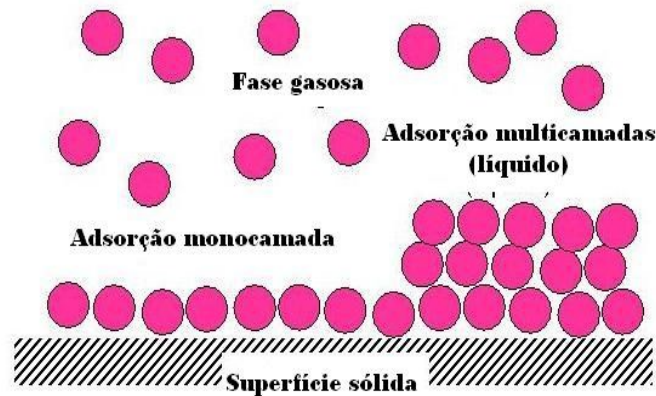
Diante do descrito, devido à composição química da gasolina, seu transporte inadequado e o derramamento do combustível em corpos aquáticos, problemas não só de poluição ambiental, mas também de saúde pública vêm se tornando cada vez mais frequentes. Em função disso, inúmeros processos têm sido estudados e novas tecnologias desenvolvidas para a remoção de contaminantes hidrogenocarbonados em corpos d'água. Dentre os mais utilizados, destaca-se o processo de adsorção.

3.3 ADSORÇÃO

Um dos grandes desafios tecnológicos no setor de tratamento de efluentes é a remoção de compostos orgânicos no meio ambiente, utilizando-se tratamentos mais efetivos e de baixo custo. O processo de adsorção tem se mostrado como uma alternativa viável no processo de purificação e separação da mistura gasolina/água, apresentando um alto índice de seletividade geométrica, como também seletividade energética, demonstrando ser um processo de relevante importância nas áreas petrolífera, de alimentos, da biotecnologia e da química fina (SOUZA; LIMA; SILVA, 2011).

A adsorção é uma operação de transferência de massa, a qual estuda a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Ilustração do processo de adsorção em monocamada e multicamadas.



Fonte: <https://www.docsity.com/pt/adsorcao>, 2019.

Segundo Guelfi e Scheer (2007), o fenômeno de adsorção é caracterizado pela habilidade de sólidos porosos reterem, por meio de interações físicas ou químicas, as moléculas de um componente de uma mistura, separando assim os componentes dessa mistura. A adsorção pode ser de natureza física ou química: na adsorção física ou fisissorção as forças de atração são relativamente fracas, pois provêm de ligações secundárias (intermoleculares), tais como forças de Van der Waals, interações dipolo-dipolo e pontes de hidrogênio, não havendo transferência de elétrons entre as fases; na adsorção química ou quimissorção ocorrem interações mais energéticas, podendo haver troca de elétrons entre as fases. Isso resulta essencialmente em uma nova ligação química e, portanto, bem mais forte que no caso da fisissorção.

Diversos fatores influenciam o processo de adsorção, tais como a área superficial, as propriedades do adsorvente e do adsorbato, a temperatura do sistema, natureza do solvente e o pH do meio. Os processos de separação por adsorção estão fundamentados em três mecanismos diferentes: o mecanismo estérico, os mecanismos de equilíbrio e os mecanismos cinéticos. Para o mecanismo estérico, os poros do material adsorvente possuem dimensões características, as quais permitem que determinadas moléculas possam entrar, excluindo as demais. Para os mecanismos de equilíbrio, têm-se as habilidades dos diferentes sólidos para acomodar diferentes espécies de adsorbatos, que são adsorvidos, preferencialmente, a outros compostos. O mecanismo cinético está baseado nas diferentes difusividades das diversas espécies nos poros adsorventes (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

O estudo da cinética de adsorção é um dos fundamentos para determinar se uma determinada biomassa apresenta eficiência na adsorção de determinado contaminante. Para complementar o estudo, devem-se determinar as isotermas de equilíbrio, as quais irão assegurar

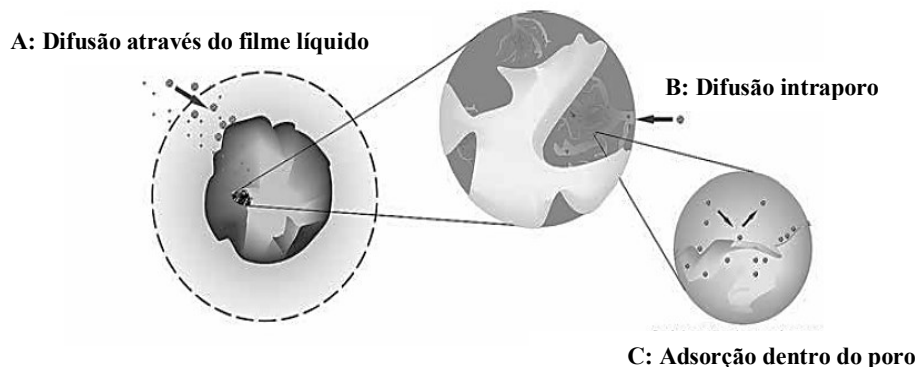
quantitativamente a capacidade de adsorção do sistema em questão.

3.3.1 Cinética de Adsorção

A cinética de adsorção é expressa como a taxa de remoção do adsorbato na fase fluida em relação ao tempo, envolvendo a transferência de massa de um ou mais componentes contidos em uma massa líquida externa para o interior da partícula do adsorvente, os quais deverão migrar através dos macroporos até as regiões mais interiores desta partícula (NACIMENTO *et al.*, 2014).

De modo geral, a cinética de adsorção pode ser conduzida por meio dos diferentes processos de adsorção: 1) difusão do soluto do seio da fase fluida para a superfície do adsorvente (difusão no filme líquido estagnado); 2) adsorção do soluto na superfície do adsorvente; 3) difusão do soluto nos poros do adsorvente (BORBA *et al.*, 2012). Estas etapas estão ilustradas na Figura 3.

Figura 3 - Etapas da cinética de adsorção.



Fonte: Adaptado de NASCIMENTO *et al.* (2014).

Conforme Nascimento *et al.* (2014), a velocidade de adsorção pode ser afetada pela temperatura, pH, força iônica, concentração inicial do adsorbato, agitação, tamanho das partículas e distribuição do tamanho dos poros.

3.3.2 Equilíbrio de Adsorção

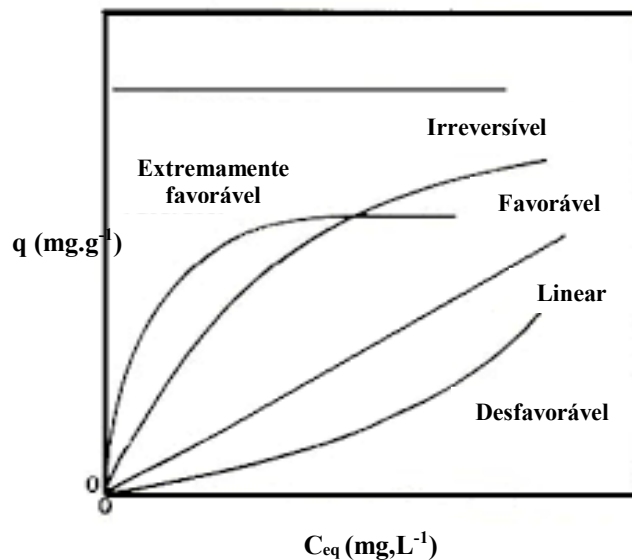
O processo experimental adsorbato-adsorvente é dito em equilíbrio quando, sob condições definidas, não houver variação na concentração da fase fluida e nem na concentração do adsorvente. Nesse estágio diz-se que o sistema atingiu o estado de equilíbrio e a capacidade

de adsorção do adsorvente (q_e) pode ser determinada utilizando-se concentrações fixas do adsorvente em um determinado volume (V) de uma série de soluções com concentrações iniciais (C_0) diferentes e conhecidas (NASCIMENTO *et al.*, 2014; BORBA *et al.*, 2012).

Os dados de equilíbrio são obtidos mediante as isotermas de adsorção, as quais são utilizadas para avaliar a capacidade de diferentes adsorventes para adsorver uma determinada molécula. As isotermas de adsorção em fase líquida são apresentadas por curvas de concentração do soluto na fase sólida, em função da concentração do soluto na fase fluida, em uma determinada temperatura. A obtenção das isotermas é, sem dúvida, a maneira mais conveniente para se especificar o equilíbrio de adsorção e o seu tratamento teórico. Portanto, as isotermas constituem a primeira informação experimental, que se utiliza para escolher entre diferentes adsorventes, o mais apropriado para uma aplicação específica. A forma das isotermas também é a primeira ferramenta experimental para conhecer o tipo de interação entre o adsorbato e o adsorvente (FERNANDES, 2005).

Os gráficos das isotermas podem apresentar-se de várias formas, fornecendo informação importante a respeito do modelo matemático que o representa. Algumas formas das isotermas estão representadas na Figura 4.

Figura 4 - Diferentes formas das isotermas de Adsorção.



Fonte: Adaptado de AQUINO (2015).

A isoterma linear passa na origem e a massa de adsorbato retida por unidade de massa do adsorvente é proporcional à concentração de equilíbrio do adsorbato na fase líquida. Já a isoterma favorável informa que a massa do adsorbato retida por unidade de massa do adsorvente

é alta para uma baixa concentração de equilíbrio do adsorbato na fase líquida; as isotermas irreversível e a desfavorável revelam que a massa de adsorbato retida por unidade de massa do adsorvente independe da concentração de equilíbrio do adsorbato na fase líquida e que a massa de adsorbato retida por unidade de massa do adsorvente é baixa, mesmo para uma alta concentração de equilíbrio do adsorbato na fase líquida (MOREIRA, 2008).

3.3.2.1 Isoterma de Freundlich

O modelo proposto por Freundlich, em 1906, foi um dos primeiros a equacionar a relação entre a quantidade de material adsorvido e a concentração do material na solução em um modelo com características empíricas. Este modelo pode ser aplicado a sistemas não ideais e em superfícies heterogêneas (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

O modelo assume que a adsorção ocorre em multicamadas, podendo ocorrer adsorção de mais de uma molécula do adsorbato em um sítio, sendo que esses sítios possuem diferentes energias de adsorção (FONSECA, 2013).

A isoterma de Freundlich é expressa pela Equação 1 (DOTTO; SOUZA; PINTO, 2011):

$$q = K_f \cdot C_e^{1/n} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

q = quantidade adsorvida no equilíbrio (mg. g⁻¹)

K_f = constante de Freundlich [(mg. g⁻¹) (L.mg⁻¹)]

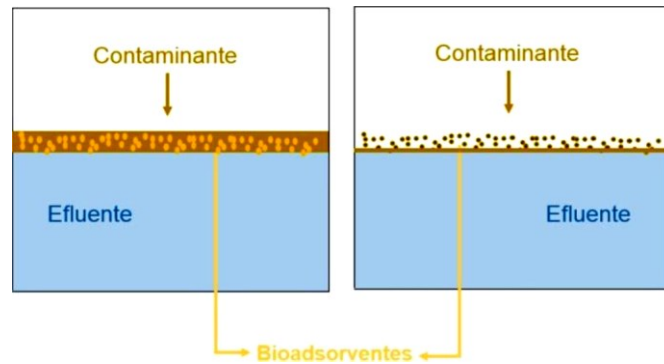
C_e = concentração do adsorbato no equilíbrio (mg. L⁻¹)

$1/n$ = constante relacionada à heterogeneidade da superfície

3.4 ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL

O sistema de adsorção em leito diferencial é uma técnica recente, que consiste em remover contaminantes de um efluente por meio de uma camada fina de bioadsorventes em contato com o efluente, proposto por Souza, Lima e Silva (2011), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Esquema representativo do leito diferencial.



Fonte: SOUZA; LIMA; SILVA (2011).

O processo de adsorção em leito diferencial tem como objetivo a ampliação de escala, para o tratamento de resíduos industriais contaminados com compostos derivados do petróleo, bem como para a purificação de corpos d'água, usando biomassa a partir de plantas nativas da região Nordeste como adsorvente. Diversos trabalhos usando o sistema de adsorção em leito diferencial foram desenvolvidos utilizando-se diferentes tipos de biomassas (AMORIM, 2016; CARVALHO, 2014; OLIVEIRA, 2017; SOUSA; LIMA, 2018).

3.5 BIOMASSA ADSORVENTE

Segundo Mckendry (2002), biomassa é um termo utilizado para representar uma série de materiais orgânicos, tais como os resíduos agrícolas, que podem ser direta ou indiretamente empregados para a geração de combustíveis como etanol, metanol, biogás, carvão vegetal e óleos.

A preparação de uma biomassa adsorvente é feita por meio de tratamentos físicos de baixo custo, tais como lavagem, secagem, trituração e peneiramento. Esses procedimentos geram um material granulado que pode ser empregado como adsorvente (VAGHETTI, 2009).

A escolha de um adsorvente adequado à separação que se deseja realizar é de importância fundamental. Segundo Ruthven (1984), em um processo de separação por adsorção, é primordial que o adsorvente apresente as seguintes características: alta seletividade, adsorção preferencial de um componente em uma mistura, área superficial específica, possibilitando o uso de equipamentos economicamente viáveis, estabilidade, boa resistência para suportar o manuseio e capacidade de regeneração por dessorção.

O processo de adsorção usando biomassas como adsorvente vem sendo uma alternativa potencialmente atrativa e econômica para o tratamento de diversos tipos de efluentes. O efeito

de diversas biomassas vem sendo estudado para a remoção de compostos orgânicos, como é o caso do petróleo e seus derivados (LIMA *et al.*, 2014; AMORIM, 2016; CARVALHO, 2014; OLIVEIRA, 2017; SOUSA; LIMA, 2018; LIMA *et al.*, 2018).

3.5.1 Palma Forrageira (*Opuntia ficus*)

A palma forrageira foi introduzida no Brasil no final do século XIX com o objetivo de produção do corante carmim, sendo logo descoberta sua vocação forrageira. No início do seu cultivo, para fins forrageiros, a palma não era de fato encarada com cultura agrícola, sendo geralmente plantada em recantos de solos de menor fertilidade. Com o passar do tempo, foi se observando sua grande exigência em relação à fertilidade do solo (CRUZ; CAVALCANTE; SANTOS., 2009).

A palma forrageira (*Opuntia ficus*) é de origem mexicana e, atualmente, encontra-se difundida em todos os continentes. No Brasil, é considerada uma das principais fontes de forragem para o gado leiteiro na região Nordeste durante o período seco do ano. Essa forrageira apresenta características de adaptação ao clima semiárido, associada à boa produtividade e alta eficiência (ALMEIDA, 2012; MARQUES *et al.*, 2017). Estima-se que existam cerca de 500 mil hectares de palma forrageira no Nordeste, distribuídos nos estados de Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Rio Grande do Norte e Bahia (SANTOS *et al.*, 2006).

A palma gigante, chamada também de graúda, azeda ou santa, é uma cultivar que pertence à espécie *Opuntia ficus*. Suas plantas são de porte bem desenvolvido e caule pouco ramificado, o que lhes transmite um aspecto ereto e crescimento vertical pouco frondoso. Sua raquete pesa cerca de 1 kg, apresentando até 50 cm de comprimento (Fotografia 1).

Fotografia 1 - Cultivar de Palma Forrageira (*Opuntia ficus*).



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

De acordo com Paulino (2013), mundialmente, a palma forrageira é usada na alimentação humana, forragem animal, como fonte de energia, na medicina, na indústria de cosméticos, na proteção e conservação do solo, na fabricação de adesivos, colas, fibras para artesanato, papel, dentre outros. A grande diversidade de usos e aplicações da palma forrageira revela a versatilidade dessa espécie vegetal, que apesar de ser cultivada no semiárido paraibano para alimentação animal, não tem sua potencialidade explorada plenamente (NUNES, 2011).

Além das aplicações supracitadas, o fato de a palma ser uma planta facilmente encontrada nas regiões semiáridas a torna uma espécie de interesse nas pesquisas em que se precise de uma biomassa fácil de ser adquirida e persistente até mesmo em épocas de grande estiagem.

3.6 SECAGEM

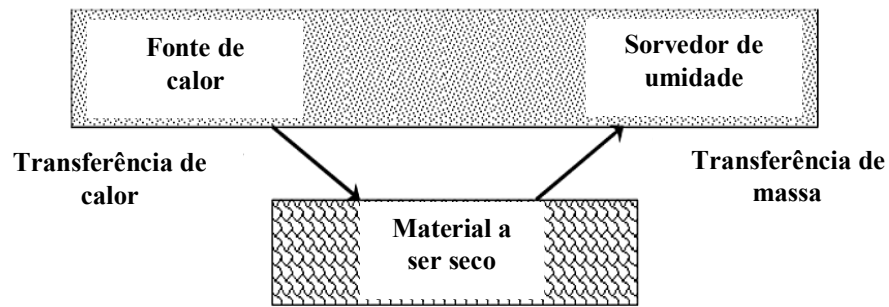
A secagem de um material sólido qualquer, envolve simultaneamente a transferência de calor e de massa, e seu comportamento é caracterizado pela análise das mudanças de umidade em função do tempo (MENEZES *et al.*, 2013).

Os processos de secagem podem ser realizados por métodos naturais e artificiais. A secagem natural baseia-se na exposição do produto úmido ao sol e ao vento. A secagem artificial é relativa ao controle das características do ar de secagem (temperatura, umidade relativa e movimentação). Os principais fatores que influenciam o processo de secagem são: temperatura, velocidade do ar, umidade relativa e pressão (Di DOMENICO; CONRAD, 2015).

A secagem artificial é uma operação que requer investimentos e possui um maior custo; entretanto, 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 de risco de deterioração do material em função do tempo de secagem ser inferior (MARTINS *et al.*, 2014).

Durante o processo de secagem torna-se necessário o fornecimento de calor para evaporação da umidade do material e deve haver um sorvedor de umidade para remoção do vapor de água formado a partir da superfície do material a ser seco (Figura 6).

Figura 6 - Esquema do processo de secagem.



Fonte: Brod, 2003.

Quando um material úmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente (MUJUMDAR, 2014):

- a) Transferência de energia (principalmente na forma de calor) do ambiente que circunda o sólido para evaporar a água superficial deste.
- b) Transferência de massa (água) do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo.

4 MATERIAL E METODOLOGIA

4.1 MATERIAL

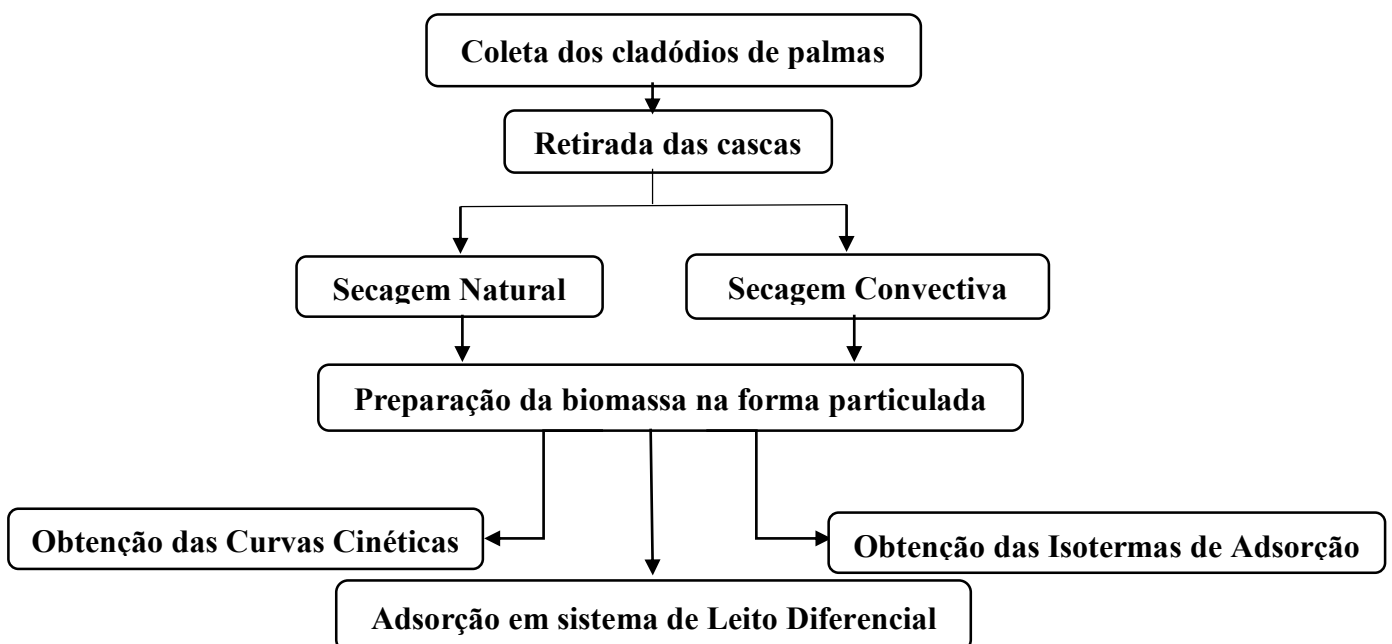
O contaminante orgânico utilizado foi a gasolina, adquirida em postos de gasolina do município de Sumé-PB. Houve a preparação da dispersão gasolina/água para simulação do efluente contaminado e, como adsorvente, utilizou-se a casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*) em sua forma particulada.

4.2 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Câmpus de Sumé-PB. Os procedimentos experimentais foram baseados na metodologia de LIMA *et al.* (2014), que utilizou o mandacaru (*Cereus jamacaru*) na forma particulada para remoção da mistura gasolina/óleo diesel por meio do processo de adsorção.

No Fluxograma 1, o fluxograma apresenta de forma geral todas as etapas desenvolvidas na metodologia, desde a coleta da palma, sua destinação aos processos de secagem, obtenção da biomassa em sua forma particulada, obtenção das curvas cinéticas, isotermas de equilíbrio e utilização do sistema de leito diferencial.

Fluxograma 1 - Todas as etapas desenvolvidas.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

4.2.1 Obtenção da biomassa seca

Os cladódios de palma forrageira (*Opuntia ficus*) foram coletados de um plantio da Universidade Federal de Campina Grande, campus Sumé-PB. Em seguida, foram retiradas as cascas para obtenção da biomassa, as quais passaram por dois processos de secagem distintos: secagem convectiva em estufa à temperatura constante de 70 °C e secagem natural.

4.2.1.1 Secagem natural

As cascas da palma forrageira foram retiradas e dispostas em bandejas (Fotografia 2). Posteriormente, foram submetidas à secagem natural permanecendo expostas ao ar livre durante dias.

Fotografia 2 - Cascas de palma forrageira (*Opuntia ficus*) dispostas em bandeja para posterior secagem natural.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

4.2.1.2 Secagem convectiva em estufa

As cascas de palma forrageira foram lavadas em água corrente para remoção de possíveis contaminantes e submetidas à secagem convectiva em estufa à temperatura constante de 70°C, durante 24 horas (Fotografia 3).

Fotografia 3 - Cascas de palma forrageira (*Opuntia ficus*) dispostas em bandeja para secagem convectiva.

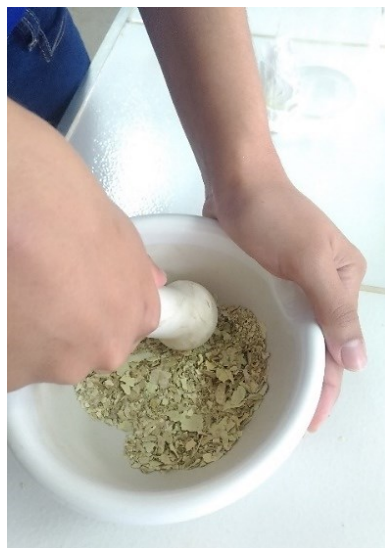


Fonte: Arquivo da autora, 2019.

4.2.2 Obtenção da biomassa na forma particulada

Após os processos de secagem, as cascas de palma forrageira foram trituradas com o auxílio de almofariz e pistilo (Fotografia 4) para obtenção da biomassa em pedaços menores. Posteriormente, para homogeneização da granulometria foram utilizadas peneiras com diâmetro de orifício de 2,83; 2,00 e 1 mm, acopladas a uma base vibratória (Fotografia 4). Para o estudo da eficiência adsorptiva da biomassa foram utilizadas as partículas com diâmetros na faixa de 0 e 1 mm.

Fotografia 4 - (a) Maceração da biomassa e (b) classificação granulométrica.



(a)



(b)

Fonte: Arquivo da autora, 2019.

4.2.3 Cinética de Adsorção

Para o estudo da cinética de adsorção, foram utilizados 12 frascos Erlenmeyer, contendo 40 mL de água destilada e 12 mL de gasolina, seguidamente colocados em uma mesa agitadora, sob agitação a 130 rpm, com variação no tempo de 5 a 60 minutos, com intervalos de 5 minutos, sendo acrescentados 1,2 g do biossorvente à solução (Fotografia 5).

Fotografia 5 - Frascos Erlenmeyer contendo a mistura água/gasolina/biomassa na mesa agitadora.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

Após cada tempo de agitação, as amostras foram submetidas à filtração utilizando uma peneira comum, de forma que a palma particulada continuasse retida no meio filtrante, enquanto a fase líquida escoasse. Por fim, com o auxílio de provetas de 50 e 100 mL, foi realizada a análise volumétrica da amostra ao final do tempo de contato entre o adsorvente e o adsorbato, para que fosse possível determinar o volume de gasolina adsorvido.

As representações gráficas das curvas cinéticas de adsorção foram obtidas utilizando o *software* ORIGIN®.

4.2.4 Equilíbrio na adsorção

Para determinação da capacidade adsorptiva da biomassa casca de palma forrageira, os experimentos foram realizados em uma mesa agitadora sob agitação de 130 rpm, na qual foram colocados 12 frascos Erlenmeyer contendo quantidade fixa de 1,2 gramas da biomassa na forma particulada e água contaminada com gasolina, variando a concentração inicial de 5 a 60% do contaminante, com variação de 5% (Tabela 1). Os doze frascos Erlenmeyer permaneceram

durante 60 minutos sob agitação na mesa agitadora e, em seguida, cada amostra foi filtrada para verificação da concentração final do contaminante por meio da utilização de provetas de 50 e 100 mL (Fotografia 6).

Tabela 1 - Valores das concentrações água e gasolina no estudo de equilíbrio de adsorção.

Concentração de gasolina (%)	Volume de Gasolina (mL)	Volume de Água Destilada (mL)
5	2,6	49,4
10	5,2	46,8
15	7,8	44,2
20	10,4	41,6
25	13,0	39,0
30	15,6	36,4
32	18,2	33,8
40	20,8	31,2
45	23,4	28,6
50	26,0	26,0
55	28,6	23,4
60	31,2	20,8

Fonte: Arquivo da autora, 2019.

Fotografia 6 - Provetas com a solução final para análise volumétrica.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

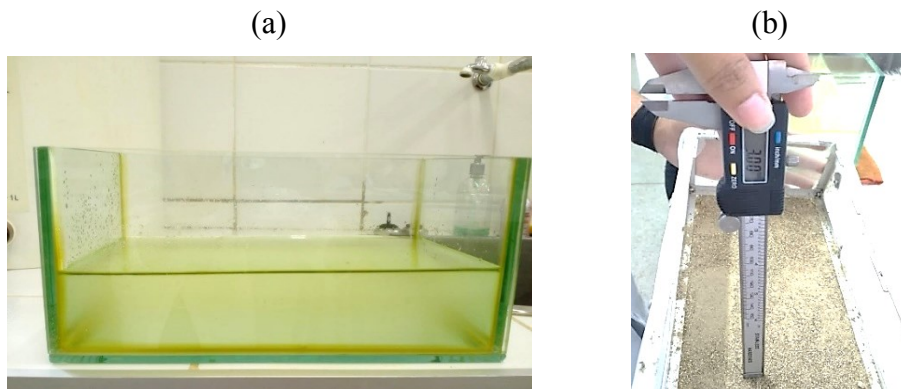
Os dados obtidos do equilíbrio de adsorção foram ajustados utilizando o modelo da isoterma de Freundlich, conforme anteriormente apresentado na Equação 1 (item 3.3.2.1 da

Fundamentação Teórica). Para obtenção das representações gráficas e aplicação do modelo matemático utilizou-se o *software* ORIGIN®.

4.2.5 Sistema de Adsorção em Leito Diferencial

O processo de adsorção em leito diferencial foi realizado conforme metodologia desenvolvida por LIMA *et al.* (2014). Inicialmente, houve a preparação da dispersão gasolina/água com a adição de 4000 mL (4 L) de mistura heterogênea ao recipiente retangular de vidro (Fotografia 7). Posteriormente, foi adicionada a biomassa (Fotografia 7) em sua forma particulada à tela de alumínio, formando uma camada de 3mm de espessura (medição com paquímetro digital).

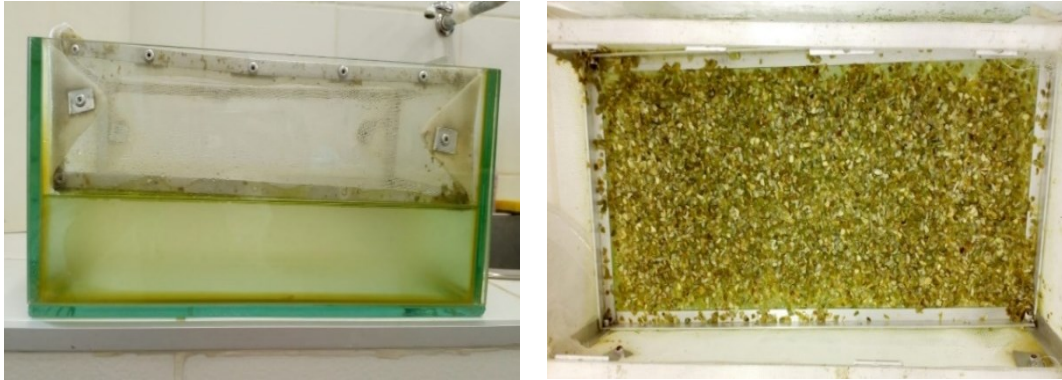
Fotografia 7 - (a) Recipiente contendo a mistura gasolina/água; (b) Biomassa particulada em espessura de 3 mm na tela de alumínio.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

Seguidamente, a tela de alumínio contendo a biomassa casca de palma forrageira na forma de pó foi sobreposta no recipiente de vidro, para que a biomassa e a mistura gasolina/água ficassem em contato direto, permanecendo por tempos de contato estabelecidos (Fotografia 8).

Fotografia 8 - Tela de alumínio sobreposta no recipiente de vidro contendo a mistura gasolina/água.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Os experimentos foram realizados em triplicadas, com percentuais de gasolina de 5%, 7,5% e 10% (Tabela 2).

Tabela 2 - Percentuais de concentração de gasolina no sistema de adsorção em leito diferencial.

Concentração de gasolina (%)	Volume de Gasolina (mL)	Volume de Água (mL)
5	200	3800
7,5	300	3700
10	400	3600

Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Estimaram-se os tempos de 0 a 45 minutos, com intervalos de 5 minutos para análise volumétrica. Findando-se o tempo de contato, o sistema de tela de alumínio foi retirado para que fosse separada a fase líquida da biomassa e, assim, analisada a quantidade adsorvida de gasolina em relação ao adsorbato, por meio de análise volumétrica com provetas (Fotografia 9).

Fotografia 9 - Análise volumétrica da quantidade de gasolina adsorvida no processo.



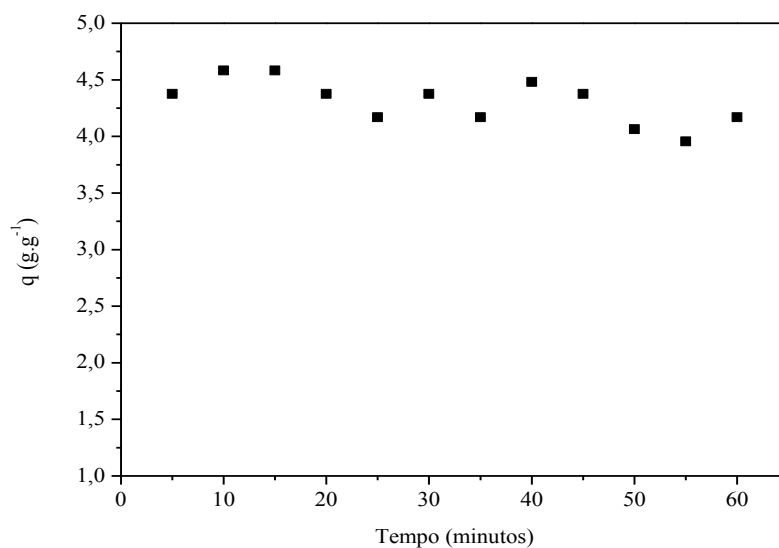
Fonte: Arquivo da autora, 2019.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Nos Gráficos 1 e 2 estão representadas as curvas referentes à quantidade de gasolina adsorvida no processo de adsorção por grama de biomassa, com relação ao tempo contato, para a palma seca ao natural e para a palma seca em estufa a 70°C, respectivamente.

Gráfico 1 - Cinética de adsorção para o sistema água/gasolina/biomassa seca ao natural.

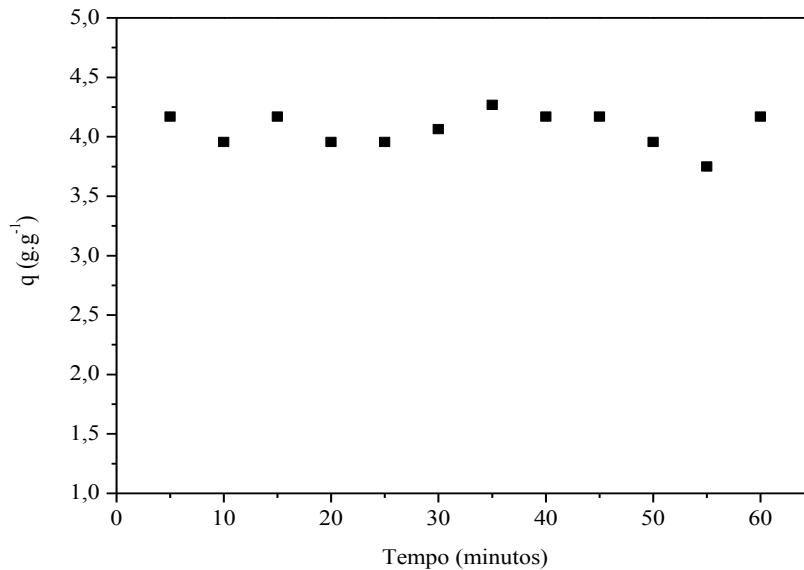


Fonte: Arquivo da autora, 2019.

Analisando o Gráfico 1, é possível observar que a cinética de adsorção por meio da biomassa casca de palma forrageira seca ao natural foi rápida, tendo início a partir dos primeiros cinco minutos de contato com o adsorbato, apresentando pequenas variações na remoção do poluente. Verificou-se uma redução significativa da concentração do poluente na solução, apresentando o menor valor de concentração no tempo de 55 minutos, equivalente a 3,96 g.g⁻¹, e maior valor no tempo de 15 minutos, com 4,58 g.g⁻¹.

Cavalcante (2018) utilizou a casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*) seca em temperatura ambiente como biomassa em seus estudos e quantificou uma capacidade adsortiva média de 4,95 g.g⁻¹ para adsorção de óleo lubrificante.

Gráfico 2 - Cinética de adsorção para o sistema água/gasolina/biomassa seca em estufa a 70°C.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

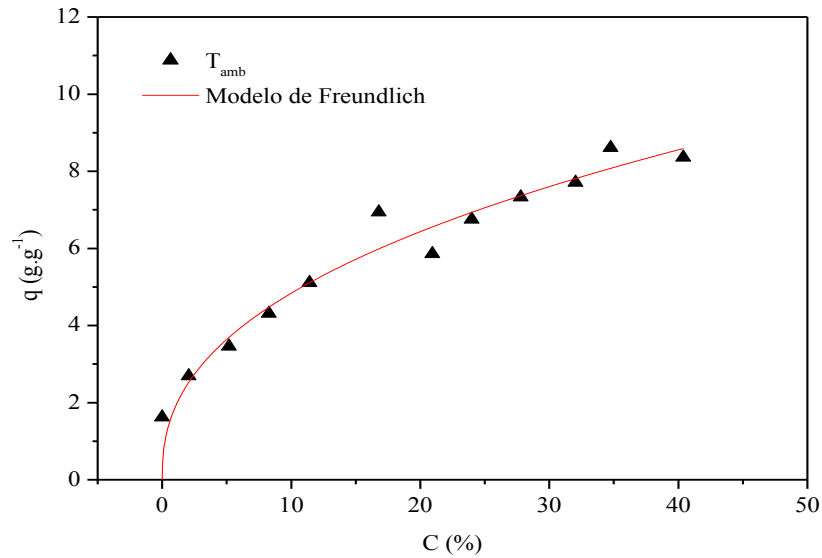
Analisando o Gráfico 2, pode-se dizer que a cinética de adsorção para a biomassa seca em estufa à temperatura constante de 70 °C ocorreu de forma rápida, visto que nos primeiros minutos já ocorreu o processo de adsorção do contaminante pela biomassa. O processo foi semelhante à cinética por meio da palma seca naturalmente; no entanto, as quantidades adsorptivas foram relativamente menores, sendo alcançada a maior quantidade de remoção de poluente igual a 4,27 g.g⁻¹ e menor quantidade de 3,75 g.g⁻¹.

De acordo com o que foi abordado por Amorim (2016), os desvios encontrados nos valores de capacidade de adsorção podem ter ocorrido devido à adsorção de água pela biomassa, provocando um deslocamento do adsorbato.

5.2 EQUILÍBRIO NA ADSORÇÃO

Os Gráficos 3 e 4 ilustram os resultados obtidos para as isothermas de adsorção utilizando a biomassa seca naturalmente e para a biomassa obtida da secagem convectiva a 70°C, respectivamente, aplicando-se o modelo de Freundlich. As isothermas de adsorção se referem às quantidades de gasolina adsorvida por grama de biomassa (g.g⁻¹) em relação à concentração do contaminante em contato com a solução.

Gráfico 3 - Curva de equilíbrio de adsorção para o sistema água/gasolina/biomassa seca naturalmente, com ajuste do modelo de Freundlich.

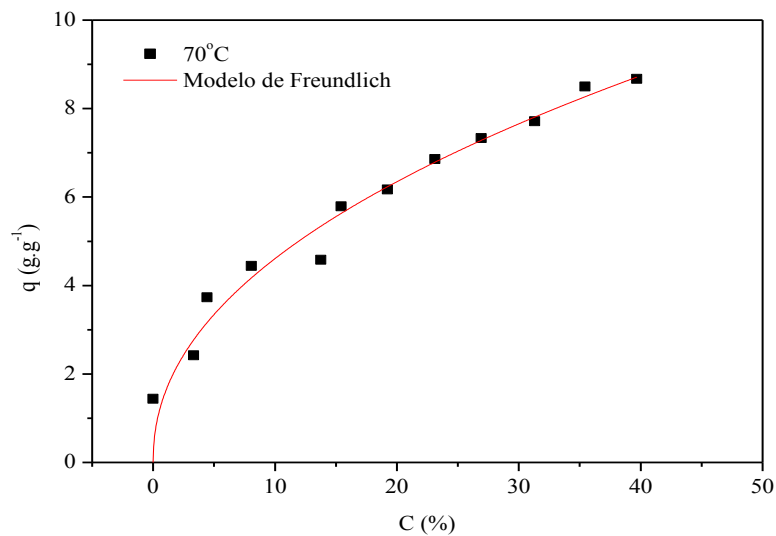


Fonte: Arquivo da autora, 2019.

Analisando o Gráfico 4 observa-se que a capacidade máxima de adsorção foi de aproximadamente $8,61 \text{ g.g}^{-1}$ na concentração de equilíbrio igual a $34,76\%$.

Comparando com Lima *et al.* (2018), que utilizaram a palma forrageira (*Opuntia tuna Mill*) sem casca, obtendo uma capacidade máxima de adsorção de $5,94 \text{ g.g}^{-1}$, bem como com Martins (2016) que utilizou a palma forrageira (*Opuntia ficus*) em seus estudos e constatou que a biomassa possuiu capacidade adsorptiva máxima de $5,445 \text{ g.g}^{-1}$, é possível confirmar que a casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*) seca em temperatura ambiente apresentou grande eficácia quando utilizada como adsorvente de gasolina presente em corpos d'água.

Gráfico 4 - Curva de equilíbrio de adsorção para o sistema água/gasolina/biomassa seca em estufa, com ajuste do modelo de Freundlich.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

A isoterma de equilíbrio à temperatura constante para o sistema utilizando a biomassa seca em estufa à 70°C, apresentada no Gráfico 4, expõe o maior valor de capacidade de adsorção igual a 8,67 g.g⁻¹ para uma concentração de equilíbrio de 39,69%.

Comparando os resultados obtidos no presente estudo com Lima *et al.* (2019), que observaram uma capacidade máxima de adsorção de 10,32 g.g⁻¹ quando utilizaram a biomassa casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*) seca em estufa à temperatura de 50°C, pode-se afirmar que os resultados do presente estudo se apresentam de forma satisfatória.

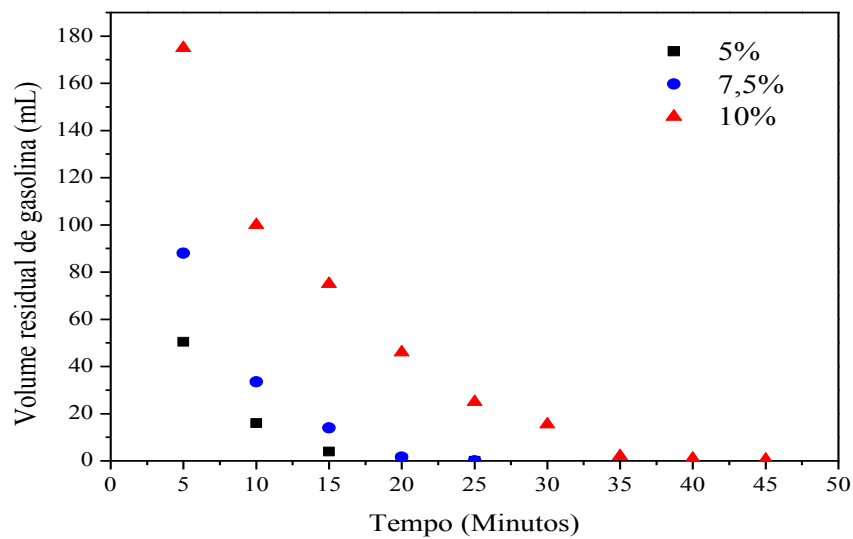
O modelo de isoterma de Freundlich ajustou-se bem aos resultados de equilíbrio para os dois sistemas em estudo (biomassa seca naturalmente e artificialmente), desse modo, propondo que o processo de adsorção ocorreu em multicamadas, ocorrendo adsorção de mais de uma molécula do adsorbato em um sítio do adsorvente.

A diferença entre os dois sistemas em estudo foi pouco significativa, apresentando valores próximos entre si, dessa maneira, indicando que ambos os processos de secagem podem ser empregados para obtenção de biomassa adsorvente de contaminantes hidrocarbonados. Com vistas à economia de energia, torna-se preferível proceder com a secagem em temperatura ambiente.

5.3 ADSORÇÃO EM SISTEMA DE LEITO DIFERENCIAL

Os Gráfico 5 e 6 apresentam os resultados referente aos volumes residuais de gasolina em relação ao tempo de contato com a biomassa seca naturalmente e seca em estufa à 70 °C, respectivamente, variando a concentração do contaminante em um sistema de leito diferencial.

Gráfico 6 - Curva da cinética de adsorção para o sistema água/gasolina/biomassa seca à temperatura ambiente, em leito diferencial, para concentrações de contaminante de 5%, 7,5% e 10%.



Fonte: Arquivo da autora, 2019.

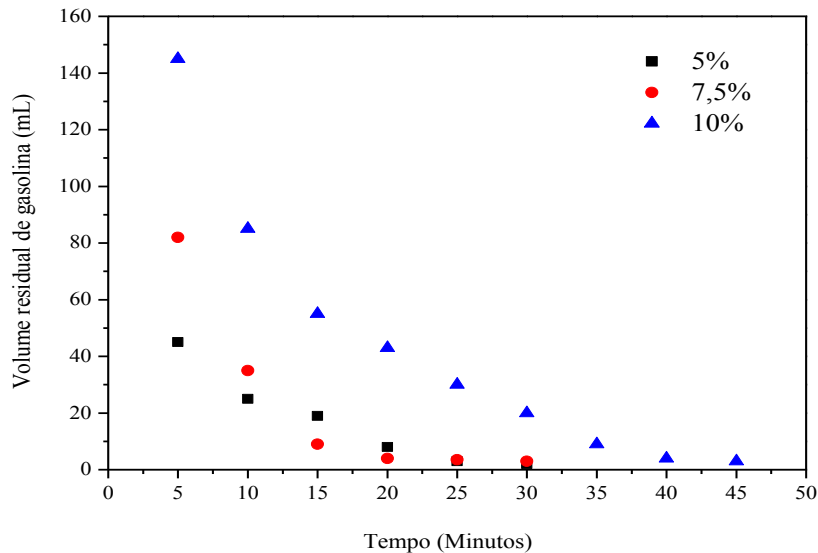
Como pode ser observado no Gráfico 7, o sistema de adsorção em leito diferencial se mostrou eficaz para as concentrações estudadas, apresentando redução no volume de gasolina nos primeiros cinco minutos de contato com partículas da biomassa.

Examinando para as concentrações de poluente iguais a 5 e 7,5%, pode-se observar que não apresentaram volume residual de gasolina, ou seja, houve um percentual de adsorção de 100% após 25 minutos de contato com a biomassa adsorvente. Para a concentração de 10%, o volume residual foi de apenas 0,5 mL de gasolina após 45 minutos de contato.

Nascimento (2018) estudou a adsorção em leito diferencial utilizando como biomassa a palma forrageira (*Opuntia ficus*) seca em temperatura ambiente e obteve em seus resultados que a adsorção para o sistema com 10% de contaminante presente mostrou ser mais eficiente, visto que o volume residual final de contaminante foi de 6,65 mL após o tempo de 35 minutos de contato com a biomassa. Para a concentração de 15%, o volume residual a 35 minutos foi de 25 mL e para a concentração de 20%, a quantidade de contaminante presente após 35 minutos

foi de 53,32 mL. Com isso, observa-se que nos experimentos deste trabalho, a eficiência adsorptiva também foi maior quando utilizadas concentrações menores de contaminante.

Gráfico 7 - Curva da cinética de adsorção para o sistema água/gasolina/biomassa seca em estufa, em leito diferencial, para concentrações de contaminante de 5%, 7,5% e 10%.



Analisando o Gráfico 7, pode-se observar que a adsorção por meio da biomassa seca em estufa foi rápida, apresentando uma redução significativa do poluente nos primeiros cinco minutos de contato, para as concentrações estudadas.

Examinando para a concentração de poluente igual a 5%, obteve-se um volume residual de apenas 2 mL após 30 minutos de contato. Para a concentração de 7,5%, após 35 minutos de contato, obteve-se um percentual de adsorção de 99%, apresentando um volume residual de apenas 3 mL.

Para o sistema de adsorção em leito diferencial contendo 10% de poluente, a maior concentração estudada, necessitou-se um tempo maior de contanto com a biomassa para obtenção de volumes residuais menores, tendo permanecido por 45 minutos.

Diante do exposto, pode-se constatar que, à medida que a concentração de contaminante foi aumentada, a eficiência diminuiu quantitativamente visto que o volume residual aumentou; porém, o perfil de adsorção manteve-se, com o acréscimo da quantidade de remoção do contaminante à medida que o tempo de contato com biomassa aumentou.

Oliveira (2017) aplicou o sistema de adsorção em leito diferencial utilizando como biomassa o sisal (*Agave sisalana*) seco em estufa a 70°C e observou uma capacidade adsorptiva de compostos orgânicos (gasolina) por meio da biomassa estudada. Entretanto, comparando

com os resultados obtidos no presente estudo, a biomassa sisal necessitou de tempos relativamente maiores de contato para adsorção máxima do contaminante na concentração de 10%.

Comparando os resultados obtidos para as diferentes biomassas, constata-se que a biomassa seca naturalmente apresentou-se de forma mais eficiente, tendo em vista ter atingido um percentual máximo de adsorção e apresentado volumes residuais mais baixos em menores tempos de contato.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As curvas cinéticas de adsorção se apresentaram de forma semelhante para os dois processos em estudo (biomassa seca em temperatura ambiente e em estufa a 70 °C), com adsorção ocorrendo nos primeiros minutos de contato da biomassa com o contaminante. No entanto, as quantidades adsorptivas foram relativamente menores quando utilizada a palma seca em estufa a 70°C.

O equilíbrio de adsorção foi alcançado, com valores considerados significativos e próximos entre si para as biomassas estudadas. As isotermas de adsorção mostraram-se bem ajustadas ao modelo de Freundlich, indicando que o processo de adsorção ocorreu em multicamadas.

Os estudos utilizando o sistema de adsorção em leito diferencial apresentaram resultados satisfatórios para ambos os processos, tornando-se um processo de grande eficácia no estudo do tratamento de efluentes contaminados por compostos derivados do petróleo.

Por meio das análises das curvas cinéticas de adsorção, estudo da capacidade adsorptiva e do sistema de adsorção em leito diferencial, pode-se confirmar que a biomassa casca de palma forrageira, obtida por meio dos diferentes métodos de secagem, se apresenta como um adsorvente com grande potencial para remoção de compostos hidrogenocarbonados presentes em corpos d'água, tendo em vista mostrar-se como uma alternativa economicamente viável e de fácil obtenção na região Nordeste.

Apesar dos resultados positivos da palma forrageira seca à temperatura de 70 °C, a proximidade dos valores dos resultados obtidos com a biomassa seca em temperatura ambiente torna este último procedimento mais viável, visto que haverá menor gasto de energia.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. F. Palma forrageira na alimentação de ovinos e caprinos no semiárido brasileiro. **Revista Verde**. v. 7, n. 4, p. 08-14, 2012.
- AMORIM, F. V. **Estudo do poder adsorptivo do resíduo gerado na produção de cerveja utilizando sistema em leito diferencial**. Trabalho de conclusão de curso em Química Industrial, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande-PB, 2016.
- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, vol.35, n.3, 2010.
- AQUINO, F. M. **Estudo da adsorção de fenol utilizando biomassa residual para aplicação no tratamento de água produzida na indústria do petróleo**. 2015. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- BENETTI, C. N. **Estudo da degradação de águas contaminadas** Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual De Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017. **artificialmente por gasolina comum via sistema fenton e foto-fenton**. 2017.
- BORBA, C. E.; MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; BORBA, F. H., BASSI, A. F.; RIBEIRO, C. Estudo da cinética e do equilíbrio de adsorção dos corantes azul turquesa qg e amarelo reativo 3r em carvão ativado. **Engevista**, V. 14, n. 2. p. 135-142, agosto 2012.
- BROD, F. P. R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. 2003. 361f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- CALDAS, A. S; VIANA, Z. C. V; SANTOS, V. L. C. S. Fibras de Cocos nucifera como sorvente de petróleo em ambiente marinho. **Acta Brasiliensis**, v. 1, n. 1, p. 13-18, jan. 2017. ISSN 2526-4338.
- 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**. Trabalho de Conclusão em Química Industrial, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.
- CAVALCANTE, L. E. **Aplicação da adsorção utilizando casca da palma forrageira (*Opuntia ficus*) como adsorvente na descontaminação de corpos d'água e da técnica de biopilhas para o solo, contaminados com gasolina**. Trabalho de Conclusão de Curso. 70 f. Universidade Federal de Campina Grande, Sumé-PB, 2018.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. –Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 51 p. 2010.
- CÔCCO, L. C. **Previsão de propriedades físico-químicas e composição química da gasolina a partir de espectros no infravermelho**. Tese (Doutorado), UFPR, 2008.
- CRUZ, P. G. da; CAVALCANTE, A. C.; SANTOS, P. M. **Palma Forrageira: Alternativa para a estacionalidade de produção de forragem no semiárido brasileiro**. Farmpoint Ovinos e Caprinos, 11p, 2009.
- Di DOMENICO, C. N. 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.
- DOTTO, G. L.; SOUZA, V. C.; PINTO, L. A. A. **Drying of chitosan in a spouted bed: The**

influences of temperature and equipment geometry in powder quality. LWT–Food Sci. and Technol., 44, 1786–1792, 2011.

FERNANDES, R. **Adsorventes Alternativos para Remoção de Fenol em Solução Aquosa.** Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, p. 78, 2005.

FONSECA, A. C. C. **Produção de carvão ativado utilizando como precursor borra de café e sua aplicação na adsorção de fenol.** Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais) - Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 51f., Curitiba, 2013.

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

LIMA, L. M. R.; COSTA, K. J. B.; OLIVEIRA, E. D. C.; OLIVEIRA, E. K. G.; SANTOS, T. C.; SILVA, V. L. M. M. **Utilização do mandacaru (*Cereus jamacaru*) como biomassa adsorvente de gasolina presente em corpos d'água.** X Encontro Brasileiro sobre Adsorção, Guarujá–SP, 2014.

LIMA, L. M. R.; MARTINS, T. D. N.; ARAÚJO, J. K. P. de; SILVA, J. L. B. C. da; OLIVEIRA, F. J. da C.; LIMA, L. M. R. Estudo da capacidade adsorptiva da biomassa de palma forrageira (*Opuntia tuna mill*) como Adsorvente para remoção de contaminantes orgânicos em corpos d'água, **12º Encontro Brasileiro sobre Adsorção-EBA**, Gramado-RS, 2018.

LIMA, L. M. R.; SILVA, J. L. B. C. Da; CAVALCANTE, L. E.; FEITOZA, E. D. A.; LIMA, L. M. R. Evaluation of adsorptive power of cactus pear forage without peel for use in removal of common gasoline in water bodies, **The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC**, Vol. 05 N. 01, 2019.

LIMA, L. M. R.; FEITOSA, E. D. A.; CAVALCANTE, L. E.; SOUSA, R. A. de; LIMA, L. M. R.; ALBUQUERQUE, T. A. **Study of use of biomass cactus pear forage dried in oven for Removal of gasoline contained in discharge waters by Adsorption process.** In: XXII National Bioprocesses Symposium (SINAFERM) e XIII Enzymatic Hydrolysis of Biomass Symposium (SHEB), Uberlândia-MG, 2019.

LOPES, V. S. M. **Avaliação preliminar da contaminação por BTEX, em água subterrânea de poços tubulares, no município de Natal-RN.** 84 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MACHADO, M. M., MACHADO, M. M., DUTRA, A. R. A., MOECKE, E. H. S.; CUBAS, A. L.V. Construção de um reator de plasma descarga corona para eliminação de compostos orgânicos voláteis. **Revista Química Nova**, Vol. 38, nº 1, p. 128-131, 2015.

MARQUES, O. F. C.; GOMES, L. S. P.; MOURTHÉ, M. H. F.; BRAZ, T. G. S.; NETO, O. S. P. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. **Caderno de Ciências Agrárias.**, v. 9, n. 1, p. 75-93, 2017.

MARTINS, C. P. **Avaliação da biodegradação de compostos BT da Gasolina, com e sem a adição de etanol, em solos residuais de gnaïsse por meio de ensaios em colunas.** Tese (Doutorado), UFV, 2015.

- 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.
- MARTINS, T. D. N. **Estudo da capacidade adsorptiva da biomassa palma forrageira (*Opuntia ficus*) como adsorvente para remoção de contaminantes orgânicos em corpos d'água.** 2016. 42f. (Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia). Universidade Federal de Campina Grande, Sumé-PB, 2016.
- MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, 2002, 1, 39.
- MENEZES, M. L. de; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D. Análise da Cinética e Ajustes de Modelos Matemáticos aos Dados de Secagem do Bagaço do Maracujá-Amarelo. **Engevista**, v.15, n.2, p. 176-186, 2013.
- MEURER, M. C; SILVA, F. V. Uso de erva-mate como biossorvente de contaminantes no tratamento da água. **Revista Tecnologia e Tendências**, Rio Grande do Sul, v.10, n.1, 2019.
- MOREIRA, S. de A. **Adsorção de íons metálicos de efluente aquoso usando bagaço do pedúnculo de caju: estudo de batelada e coluna de leito fixo.** 2008. 133 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) - Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying.** 4. ed. Cingapura: Crc Press, 1348 p, 2014.
- NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais.** 1ed. Fortaleza-CE. Imprensa Universitária, 256p., 2014.
- NASCIMENTO, V. DE F. **Avaliação da eficiência da adsorção em leito diferencial, utilizando casca de palma forrageira (*Opuntia stricta*) como biossorvente, na remoção de contaminantes orgânicos em corpos d'água.** Trabalho de Conclusão de Curso. 40 f. Universidade Federal de Campina Grande, Sumé-PB, 2018.
- NUNES, C. S. Usos e aplicações da palma forrageira como uma grande fonte de economia para o semiárido nordestino. **Revista Verde.** Mossoró–RN. v.6, n.1, p. 58–66, 2011.
- OLADOJA, N. A.; UNUABONAH, E. I.; AMUDA, O. S.; KOLAWOLE, O. M. Progress and prospects of polysaccharide composites as adsorbents for water and wastewater treatment. *In: OLADOJA, N. A.; UNUABONAH, E. I.; AMUDA, O. S.; KOLAWOLE, O. M. Springer Briefs in Molecular Science*, cap. 4, p. 65-90. Berlim: Springer, 2017.
- OLIVEIRA, E. D. C. **Remoção de gasolina em corpos d'água utilizando sisal (*Agave sisalana*) como adsorvente em sistema de adsorção em leito diferencial.** 2017. (Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande-PB, 2017.
- OLIVEIRA, L. H. DE; SOUZA, S. M. A. G. DE; SOUZA, A. A. U. DE. Aplicação de adsorventes para o tratamento de emulsões óleo/água. **Brazilian Journal of Development**, Santa Catarina, v.5, n.4, 2019.

- PAULINO, J. R. L. **Palma Forrageira na Alimentação de Ruminantes no Semiárido – Revisão**. 2013. 30f. (Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia). Universidade Federal da Paraíba, Areia – PB, 2013.
- PENG, C.; LEE, J. W.; SICHANI, H. T.; NG, J. C. Toxic effects of individual and combined effects of BTEX on *Euglena gracilis*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 284, p. 10–18, 2015.
- RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Process**. New York, John Wiley and Sons, 1984.
- SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semiárido da Paraíba, **Revista OKARA: geografia em debate**, v.1, n.1, 1-152, 2007.
- SANTOS, D. C.; FARIAS, I.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; ARRUDA, G. P.; COELHO, R. S. B.; DIAS, F. M.; MELO, J. N. **Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia e Nopalea*) em Pernambuco**. Recife: IPA, 2006. 48p. (IPA. Documentos, 30).
- SILVA, F. L. N.; JR, J. R. S.; NETO, J. M. M.; SILVA, R. L. G. N. P.; OLIVEIRA, D. L. F. J. E. Determinação de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos em gasolina comercializada nos postos do estado do Piauí. **Revista Química Nova**, Teresina-PI, Vol. 32, No. 1, 56-60, 2009.
- SILVA, R. P. **Remoção de metais pesados em efluentes sintéticos utilizando vermiculita como adsorvente**. 2010. Doutorado (Tese), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- SION, A.; GIOVANNI, P.; MARIA, C. D. Responsabilidade e consequências dos acidentes ambientais por vazamento de óleo. **Revista Petróleo & Energia**, 27^a ed., 2014.
- SOUSA, R. A; LIMA, L. M. R. Estudo da remoção de contaminantes orgânicos em corpos d'água pelo método da adsorção em leito diferencial, utilizando casca de palma forrageira (*Opuntia ficus*) como biossorvente. In: XV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2018, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFCG, 2018. Volume I. ISSN 2177-112X.
- 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 (2011) 123-126, ISSN 1809- 8797, 2011.
- TAVARES, J. K. **Remoção de Compostos BTEX de Soluções Aquosas por Adsorção**. 2007. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- TIBURTIUS, E. R. L.; ZAMORA, P. P.; LEAL, E. S. Contaminação De Águas Por Btxs E Processos Utilizados Na Remediação De Sítios Contaminados. **Revista Química Nova**, Curitiba-PR, Vol. 27, No. 3, 441-446, 2004.
- VAGHETTI, J. C. P. Pecan nutshell as biosorbent to remove Cu (II), MN (II) and PB (II) from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 162, n. 1, p. 270-280, 2009.
- VARJANI, S. J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. **Bioresource Technology**, v. 223, p. 277–286, 2017.
- <http://universechemistry.blogspot.com/2017/06/revisao-para-prova-do-3-ano-purificacao.html>. Acesso em: 23 de setembro de 2019.