

II-145 - AVALIAÇÃO DA SORÇÃO DE ÓLEO PELAS MACRÓFITAS DA ESPÉCIE *EICHHORNIA CRASSIPES*

Elaine Lins dos Santos Albuquerque⁽¹⁾

Técnica em Química Industrial pelo Instituto Federal de Pernambuco (IFPE). Graduanda em Licenciatura Plena em Química na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Laís Alexandre Nascimento⁽²⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Doutoranda em Engenharia Química pela UFPE.

Marilda Nascimento Carvalho⁽³⁾

Engenheira Química pela Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). Licenciada em Química pela UNICAP. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Doutora em Engenharia Química pela UFPE. Pós-doutorada em Engenharia Química pela UFPE.

Mohand Benachour⁽⁴⁾

Engenheiro Química pela Ecole Nationale Polytechnique D'Alger. Mestre em Genie Biologique pela Université de Technologie de Compiègne. Doutor em Génie Des Procédés pela Institut National Polytechnique de Lorraine. Pós-doutor pela Université Henry Poincaré.

Eleonora Maria Pereira de Luna Freire⁽⁵⁾

Química Industrial pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em Ciências pela UFPE. Doutora em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Endereço⁽¹⁾: Rua do Patrocínio, 145 - Várzea - Recife - PE - CEP: 50740-210 - Brasil - Tel: +55 (81) 99613-7324 - e-mail: elaine.lins01@outlook.com

RESUMO

Efluentes oleosos são extremamente danosos para o meio ambiente e saúde pública, demandando tratamentos que atendam aos limites exigidos pela legislação ambiental vigente. A sorção é uma das técnicas mais utilizadas na remoção de óleos, por aliar eficiência e fácil operação. As plantas aquáticas, conhecidas como macrófitas, são ótimas opções sustentáveis como materiais sorventes. A espécie *Eichhornia crassipes*, conhecida como aguapé e baronesa, é constantemente aplicada no tratamento de efluentes devido à sua resistência e expressiva capacidade de remoção de poluentes como derivados de petróleo e metais pesados. Portanto, neste trabalho foi investigada a eficiência de remoção de óleos minerais por macrófitas aquáticas *in natura* da espécie *Eichhornia crassipes*, por meio da caracterização das baronesas (determinação do pH do ponto de carga zero, flutuabilidade e molhabilidade) e de ensaios de sorção (cinética e equilíbrio). Através da caracterização foi possível identificar estruturas e parâmetros da *Eichhornia crassipes* favoráveis à biossorção de óleos em meio aquoso. Nos ensaios de cinética foi constatado que após 6 horas, a *Eichhornia crassipes* removeu 83,39% do óleo mineral, atingindo este uma concentração final de 13,29 mg.L⁻¹. Nos ensaios de equilíbrio foi verificado que a maior eficiência de remoção (94,79%) foi alcançada na concentração inicial de 160 mg.L⁻¹, atingindo-se uma concentração final de 8,65 mg.L⁻¹. Os resultados revelaram o grande potencial da *Eichhornia crassipes* na remoção de óleos em meio aquoso, uma vez que através de um tratamento simples é possível reduzir a concentração de óleos minerais em efluentes para valores menores que o limite imposto pela Resolução CONAMA 430/2011 de 20 mg.L⁻¹. O tratamento de efluentes oleosos via biossorção com baronesas demonstra ser uma ótima alternativa por promover uma remoção eficiente e também por sua sustentabilidade uma vez que são utilizadas macrófitas, materiais biodegradáveis e abundantes que tendem a ser descartadas como resíduos.

PALAVRAS-CHAVE: Efluentes Oleosos, Óleo Mineral, Biossorção, Fitorremediação, *Eichhornia crassipes*, Baronesas.

INTRODUÇÃO

Ao serem descartados incorretamente, os efluentes oleosos causam grandes impactos em decorrência dos seus poluentes nocivos ao meio ambiente e à saúde pública (MIRSHAFIE; REZAAE; MAMOORI, 2018). Portanto, é fundamental que as indústrias sejam capazes de garantir que as concentrações de óleos nos

efluentes não ultrapassem os limites definidos pela legislação ambiental vigente. Entre as opções disponíveis na engenharia, a fitorremediação tem sido cada vez mais utilizada no tratamento de efluentes por promover uma remoção de poluentes eficiente e sustentável (NG; CHAN, 2017). A sorção é o principal mecanismo utilizado pelas plantas para tratar águas residuárias, sendo, portanto, um importante objeto de estudo para compreender o processo da fitorremediação (ROY; MONDAL, 2017). As macrófitas aquáticas constituem o principal tipo de plantas aplicadas no tratamento de efluentes, destacando-se entre elas a espécie *Eichhornia crassipes* (também conhecida como baronesa e aguapé) devido à sua resistência à toxicidade de poluentes como corantes, metais pesados e óleos minerais e capacidade de remoção destes poluentes (YIN et al., 2017).

O óleo combustível pesado, *heavy fuel oil* (HFO), é largamente utilizado em fábricas, usinas e refinarias devido ao seu baixo custo, sendo desta forma constantemente presente em efluentes oleosos industriais (GARANIYA et al., 2018). O HFO é considerado como um dos óleos mais perigosos para o meio ambiente e para a população, por apresentar uma persistência e toxicidade elevadas no ecossistema marinho, além de serem considerados carcinogênicos, altamente prejudiciais para a saúde (CHENG et al., 2018).

Neste trabalho, foi realizada uma previsão do comportamento de macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes* que serão utilizadas em um sistema de tratamento de efluentes oleosos a ser instalado em uma companhia energética localizada no município de Candeias (Bahia).

A investigação do desempenho do tratamento foi composta pela caracterização das macrófitas e por ensaios de bioassorção. A caracterização foi realizada através de experimentos em que se determinaram o pH do ponto de carga zero (pH_{PCZ}), flutuabilidade e molhabilidade das baronesas. Também foram determinadas a densidade e viscosidade do óleo mineral, com o intuito de se confirmar sua classificação. Por fim, foram realizados ensaios em escala de bancada onde foi determinada a eficiência de remoção de óleo mineral pelas macrófitas em diferentes condições de tempo de contato e concentração inicial do efluente.

A partir dos resultados obtidos em laboratório foi possível concluir que a *Eichhornia crassipes* tem potencial expressivo para ser aplicada em tratamentos de efluentes oleosos. Ajustes na concentração inicial do óleo e do tempo de contato garantem que a bioassorção remova quase que a totalidade dos resíduos oleosos presentes no efluente, possibilitando que as baronesas sejam aplicadas em qualquer etapa do tratamento sem prejudicar a eficiência deste.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Análises Minerais, Solos e Água (LAMSA) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e contou com o apoio da Companhia Energética Candeias (CEC), integrante da Global Participações em Energia S/A.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução deste trabalho, foram coletadas macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes* no Açude de Apipucos, localizado no bairro de Apipucos em Recife (PE). As baronesas foram lavadas com água da torneira e água destilada até remoção de todos sólidos grosseiros visíveis presos nas raízes e folhas. Posteriormente, as plantas foram dispostas em baldes para serem cultivadas em 15 litros de água da torneira em um local à sombra. À medida que eram retiradas dos baldes para serem utilizadas nos experimentos, outras macrófitas foram coletadas, lavadas e cultivadas.

O estudo foi desenvolvido contemplando duas etapas. Na primeira etapa, as baronesas e o óleo mineral utilizado no trabalho foram caracterizados para se obter maiores informações sobre a bioassorção. Por fim, na segunda etapa foram realizados ensaios de cinética e equilíbrio para a determinação da eficiência de remoção de óleo pelas macrófitas.

PRIMEIRA ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DAS BARONESAS E DO ÓLEO MINERAL

Devido às exigências das metodologias, a caracterização das macrófitas foi realizada utilizando biomassa seca e triturada. As baronesas foram submetidas a uma semana de secagem à sombra, com o intuito de reduzir a umidade, sendo posteriormente secadas em estufa, onde permaneceram por 48h a $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$. As macrófitas secas foram separadas em três frações, raízes, pecíolos (caules) e folhas, e trituradas em moinho de facas

modelo Pulverisette 14, da marca Fritsch, no Laboratório Integrado de Tecnologia Mineral, também localizado na UFPE. O material triturado foi peneirado manualmente, obtendo-se partículas com granulometrias de 30 e 50 mesh (Figura 1).



Figura 1: Da esquerda para direita: raízes, folhas e pecíolos com granulometria de 50 mesh

As baronesas foram caracterizadas através do pH_{PCZ} , flutuabilidade e molhabilidade. Em todos os ensaios as raízes, os pecíolos e as folhas foram analisados separadamente.

Para determinação do pH_{PCZ} , foram colocadas 0,05 g de cada fração da baronesa em contato com 50 mL de água destilada em erlenmeyers de 500 mL. Foram realizados 11 ensaios em duplicata com o pH inicial variando de 1 a 11, utilizando ácido clorídrico P.A. e hidróxido de sódio P.A., ambos da marca Dinâmica. Após 24h sob agitação de 150 rpm em um shaker modelo MA-420, da marca Marconi, foi realizada uma nova leitura de pH. Com os dados obtidos das medições, construiu-se o gráfico pH_{final} versus $pH_{inicial}$ através do qual foi possível determinar o pH_{PCZ} , observado a partir do momento que o pH_{final} atingiu valores constantes (ROMERO-GUZMÁN *et al.*, 2013).

O método utilizado para observar a flutuabilidade da *Eichhornia crassipes* foi o apresentado por Rani *et al.* (2014). Foram pesadas 1g de cada material seco e triturado das raízes, pecíolos e folhas. Posteriormente, cada parte foi adicionada à 250 mL de água destilada em um bêquer, permanecendo em repouso. Após 15 minutos foi observado o comportamento de cada fração da *Eichhornia crassipes*, comparando a massa de material flutuante com a inicialmente inserida em cada bêquer. O ensaio foi executado em triplicata.

A molhabilidade foi determinada através da ascensão capilar, pelo método de Washburn (JAINE; MUCALO, 2015; YANG; CHEN; ZHANG, 2014). Tubos de vidro com 40 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro foram preenchidos por folhas, pecíolos e raízes triturados da *Eichhornia crassipes*, com cerca de 50 mesh. Com suas extremidades inferiores seladas por lá de vidro, os tubos foram inseridos em bêqueres contendo o líquido a ser estudado: hexano ou água. O tempo e a altura iguais a zero foram considerados quando os níveis de líquido dentro dos tubos e dos bêqueres estavam iguais. A ascensão capilar foi verificada através da altura do líquido no tubo de vidro empacotado a cada 30 segundos, durante 10 minutos.

O óleo mineral utilizado neste trabalho foi doado pelo grupo Centrais Elétricas da Paraíba S.A. (EPASA), sendo o mesmo óleo utilizado na CEC, onde será instalado o sistema de tratamento de efluentes oleosos. Para confirmar a classificação do óleo como combustível pesado, foi realizada a sua caracterização física por meio da determinação de sua densidade, através de um tensiômetro Titronic 300, e sua viscosidade, pelo copo Ford Nº4.

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

Os gráficos de ponto de carga zero das folhas, dos pecíolos e das raízes da espécie *Eichhornia crassipes* (biomassa seca) estão expostos nas Figuras 2, 3 e 4, respectivamente.

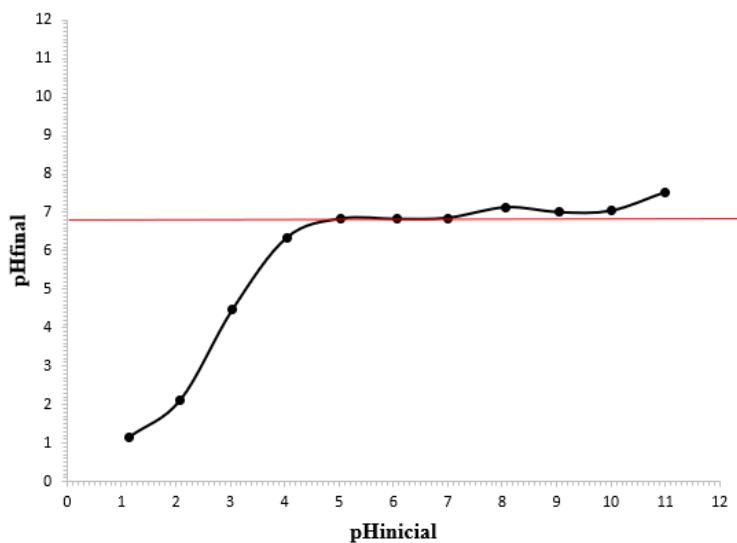


Figura 2: Ponto de carga zero das folhas secas das baronesas

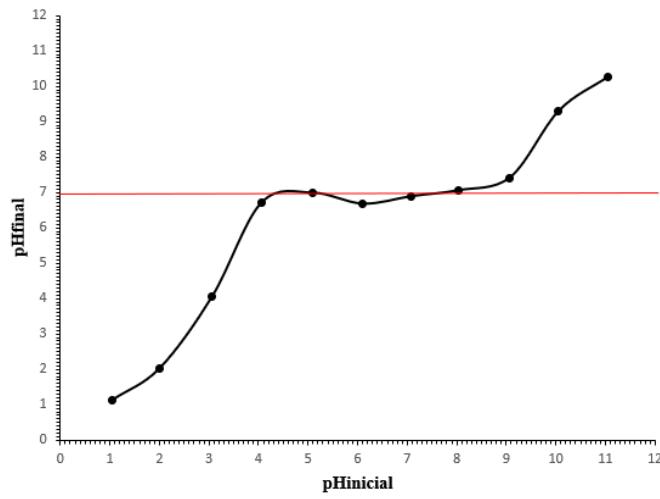


Figura 3: Ponto de carga zero dos pecíolos secos das baronesas

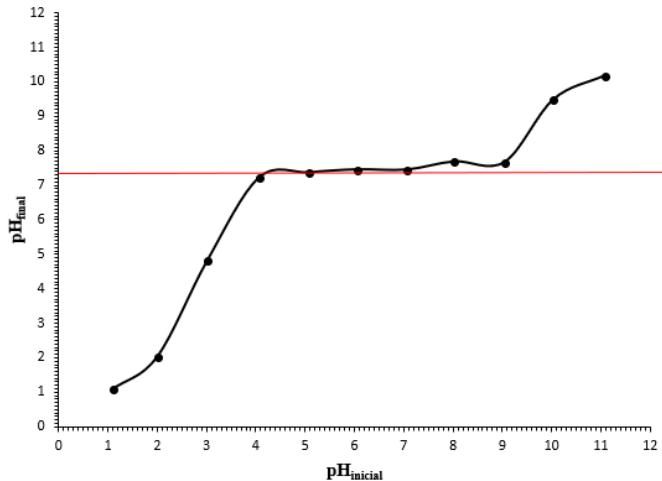


Figura 4: Ponto de carga zero das raízes secas das baronesas

De acordo com os gráficos das Figuras 2 a 4, é possível observar que as três partes das macrófitas obtiveram valores próximos de pH_{PCZ}. No experimento com as folhas, o equilíbrio de cargas positivas e negativas na superfície é atingido em torno do pH_{final} 6,8. Nos caules, o pH_{PCZ} foi aproximadamente igual a 7. Por fim, para as raízes, foi determinado um valor de pH_{PCZ} em torno de 7,4. Em todas as águas oleosas utilizadas nos experimentos de sorção, foram verificados pHs em torno de 5,5. Portanto, como o pH das soluções foi inferior ao pH_{PCZ} das superfícies das raízes, pecíolos e folhas, ao entrar em contato com o efluente produzido a superfície da macrófita é submetida a um carregamento elétrico positivo, favorecendo a interação com espécies negativas (ROMERO-GUZMÁN et al., 2013).

A flutuabilidade das folhas, pecíolos e raízes da *Eichhornia crassipes* foi verificada a partir do comportamento das partes da macrófita adicionadas na superfície de um volume de água destilada. Na Figura 5 encontra-se o registro fotográfico do referido experimento.



Figura 5: Flutuabilidade das folhas, pecíolos e raízes secos

Após 15 minutos, cerca de 49,7% dos pecíolos e 19,3% das folhas ainda permaneceram flutuando na água. As raízes, por sua vez, afundaram rapidamente, demonstrando uma baixa flutuabilidade. O resultado da flutuabilidade está em concordância com a anatomia da *Eichhornia crassipes*. Os pecíolos, responsáveis pela flutuação natural das baronesas nos ambientes alagados, são compostos por aerênquimas, tecidos vegetais grandes espaços intercelulares preenchidos por ar. Apesar das raízes e folhas também apresentarem espaços devido aos parênquimas, nos pecíolos estas cavidades são mais numerosas, o que proporciona uma maior flutuabilidade (MAHMOOD et al., 2005; RAJA; ISLAM; BASU, 2016; RANI et al., 2014)

Os resultados da determinação da molhabilidade das raízes, pecíolos e folhas da *Eichhornia crassipes* via ascensão capilar de hexano encontram-se na Figura 6.

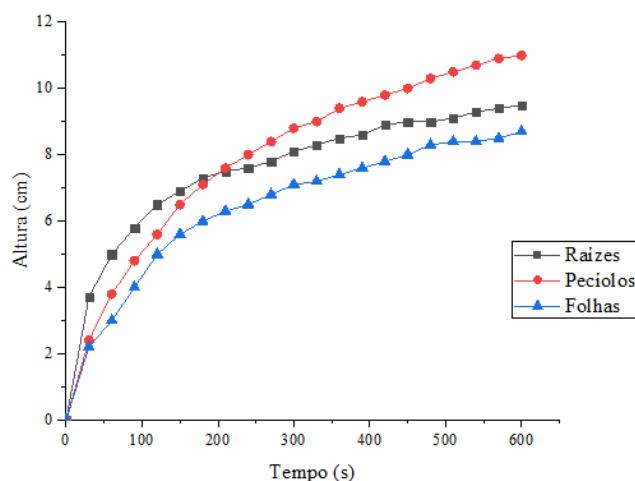


Figura 6: Molhabilidade por ascensão capilar de hexano sobre a *Eichhornia crassipes* (biomassa seca)

Na Figura 6, observa-se que entre as três frações estudadas da baronesa, os pecíolos apresentaram uma maior molhabilidade com o hexano. Resultados semelhantes foram obtidos por Rani *et al.* (2014) e por Yang, Chen e Zhang (2014). De acordo com os autores, a afinidade dos pecíolos com o hexano, como demonstrado nos testes de molhabilidade, aponta que esta fração da *Eichhornia crassipes* é mais hidrofóbica do que as folhas e as raízes. A hidrofobicidade dos pecíolos e a sua estrutura oca observada na micrografia, exposta na Figura 20, apresentam fortes indícios de que são ótimos materiais biossorventes de óleo (DONG; CAO; XU, 2017; WAHI *et al.*, 2013; YANG; CHEN; ZHANG, 2014).

Na Figura 7, encontram-se os resultados obtidos no molhamento das raízes, pecíolos e folhas através da ascensão capilar da água.

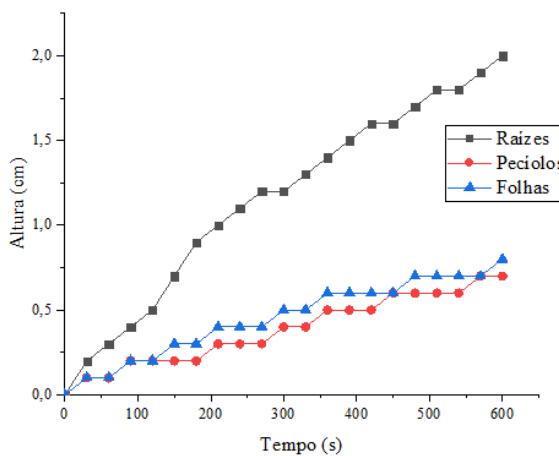


Figura 7: Molhabilidade por ascensão capilar de água sobre a *Eichhornia crassipes* (biomassa seca)

Observa-se na Figura 7 que a água atingiu maiores alturas nas raízes do que nas folhas e nos pecíolos. O mesmo resultado foi obtido por Rani *et al.* (2014), que relacionaram esta ascensão capilar com a hidrofilicidade das raízes que, aliada com os poros em sua estrutura, indica a ocorrência da sorção de água. Porém, comparando-se as Figuras 6 e 7, é constatado que a taxa de molhamento por ascensão capilar de água ocorreu de forma mais lenta do que nos experimentos realizados com hexano, em todas as partes da macrófita. Avaliando a planta como um todo, este comportamento indica que a sorção de óleos é favorecida na *Eichhornia crassipes*, uma vez que as raízes, pecíolos e folhas apresentaram uma maior afinidade com hexano do que com água, demonstrada pela rapidez e pelas alturas atingidas na ascensão capilar (RIBEIRO; SMITH; RUBIO, 2000; YANG; CHEN; ZHANG, 2014).

Na caracterização física do óleo mineral, foram obtidos resultados de 0,955 g.cm⁻³ para densidade e 2854,79 cP para viscosidade cinemática. De acordo com a norma F726-17 da American Society for Testing and Materials (ASTM), os referidos valores encontrados para densidade e viscosidade classificam o óleo utilizado como óleo combustível pesado em inglês, heavy fuel oil (HFO).

SEGUNDA ETAPA: ENSAIOS DE BIOSSORÇÃO (CINÉTICA E EQUILÍBRIO)

Com o intuito de investigar o comportamento e a eficiência das baronesas no tratamento de efluentes oleosos, optou-se por realizar os testes preliminares de sorção em escala macroscópica, utilizando plantas inteiras *in natura*. Para reduzir o erro ao mínimo possível, foram utilizadas macrófitas que apresentaram uma massa média de 80 ± 5 g. Para os ensaios de sorção, as plantas também foram coletadas no Açude de Apipucos e submetidas a lavagens com água de torneira a destilada.

Para a execução dos testes de biossorção, foi utilizado um arranjo de bancada composto por funis de vidro, com capacidade de 1 litro, com torneiras instaladas nas hastes, para facilitar o controle da drenagem do fluido. Nos funis, foram utilizadas amostras de água oleosa sintética produzida em laboratório juntamente com baronesas limpas e previamente pesadas. Ao fim de cada ensaio de cinética e de equilíbrio, foi realizada a

drenagem da fase aquosa até 3 cm abaixo da superfície. A água remanescente do funil contendo manchas oleosas foi drenada para um balão de separação. Após remoção do conteúdo aquoso, o funil foi lavado com 30 mL de hexano até a remoção do óleo aderido nas paredes. O hexano e óleo removido na lavagem foram transferidos para o mesmo balão de separação contendo a água oleosa drenada.

A concentração de HFO foi determinada utilizando um espectrofotômetro UV-VIS Pharo 300, cujas análises foram realizadas mediante curva analítica previamente preparada em concentrações variando de 5 a 150 mg.L⁻¹. Foi utilizado o comprimento de onda de 280 nm, obtido também previamente por uma varredura espectral a qual indicou a região de maior absorbância.

Nos ensaios de cinética, foi avaliada a influência do tempo de contato na eficiência de remoção de óleo pelas macrófitas. Nos funis, as macrófitas foram adicionadas juntamente com uma água oleosa sintética com concentração aproximada de 80 mg.L⁻¹, produzida com 500 mL de água destilada e 40 mg de HFO. Foram utilizados os tempos de contato de em contato durante os tempos de 5, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 300 e 360 minutos.

Os ensaios de equilíbrio foram executados para avaliar a influência da variação da concentração inicial na remoção de HFO pelas macrófitas. Para isto, foram produzidas águas oleosas sintéticas de concentrações de 80, 160, 240, 320, 400 e 480 mg.L⁻¹. Os efluentes foram introduzidos nos funis juntamente com as macrófitas. Após 2 horas, as amostras foram analisadas através da mesma metodologia utilizada para os experimentos de cinética.

A eficiência de remoção de óleo pelas macrófitas em todos ensaios de sorção foi determinada pela Equação 1.

$$R(\%) = (C_o - C_f / C_o) \times 100 \quad \text{equação (1)}$$

Sendo: C_o , a concentração inicial do poluente (mg.L⁻¹); C_f , a concentração final do poluente (mg.L⁻¹)

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

O estudo preliminar da cinética da biossorção de HFO pela *Eichhornia crassipes* foi realizado através da variação do tempo de contato da macrófita com um efluente oleoso sintético com concentração de 80 mg.L⁻¹. A evolução da remoção de óleo pelas baronesas está apresentada na Figura 8, com os resultados da biossorção após 5, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 300 e 360 minutos de experimento.

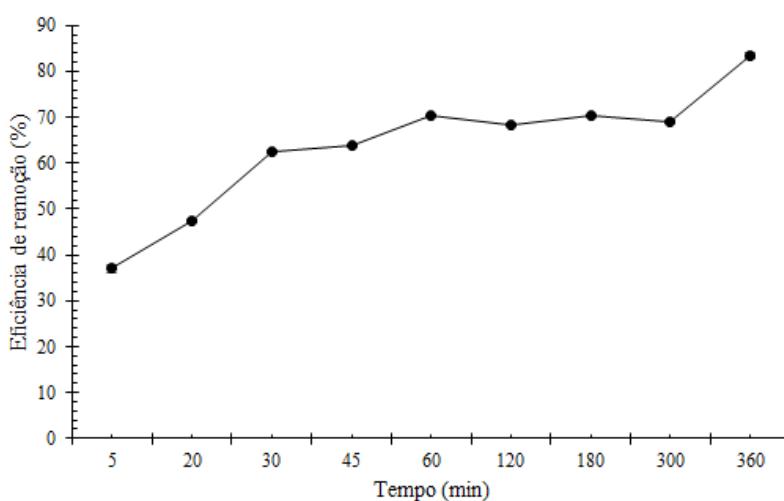


Figura 8: Efeito do tempo de contato na remoção de HFO pela *Eichhornia crassipes* in natura

Conforme observado na Figura 8, o HFO começou a ser removido rapidamente pela *Eichhornia crassipes*, a remoção do óleo permaneceu crescente até os primeiros 60 minutos, apresentando posteriormente um

comportamento estável até 300 minutos, apesar de algumas oscilações. A máxima remoção de HFO, $83,39 \pm 1,13\%$, foi atingida após 360 minutos experimento, reduzindo a concentração final de óleo para $13,29 \text{ mg.L}^{-1}$ valor inferior a 20 mg.L^{-1} , limite estabelecido pela Resolução CONAMA 430/2011 para óleos minerais em efluentes (BRASIL, 2011).

Os resultados ressaltam a superioridade da *Eichhornia crassipes* no tratamento de efluentes oleosos, em comparação com outras biomassas vivas, devido à rapidez que as concentrações de óleo mineral foram reduzidas. Al-Baldawi *et al.* (2015) avaliaram a fitodegradação de óleo diesel presente em um efluente sintético com concentração inicial de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ pela macrófita aquática *Scirpus grossus*, atingindo reduções de 50% e 81,5% após 14 e 72 dias de tratamento, respectivamente. Sanusi *et al.* (2016) alcançaram uma remoção de 52% de óleo diesel utilizando a planta *Paspalum scrobiculatum L.* após 72 dias de tratamento em um efluente sintético com concentração inicial de 3%. Effendi, Munawaroh e Ayu (2017) investigaram o desempenho da gramínea *Vetiveria zizanioides* no tratamento de água oleosa, obtendo uma redução de 62,47% na concentração de petróleo bruto, após 2 semanas, em um efluente sintético (concentração inicial de 1%).

Após avaliar os resultados obtidos no estudo cinético preliminar, observou-se que entre 60 e 300 minutos as remoções apresentaram um comportamento pouco variável. Portanto, com o intuito de reproduzir condições de equilíbrio, escolheu-se 120 minutos como tempo de duração dos experimentos para investigar o efeito da concentração na biossorção de óleo mineral pela *Eichhornia crassipes*. Na Figura 9 são apresentados os resultados da variação da concentração inicial em 80, 160, 240, 320, 400 e 480 mg.L^{-1} do efluente sintético na eficiência de remoção de HFO pelas baronesas.

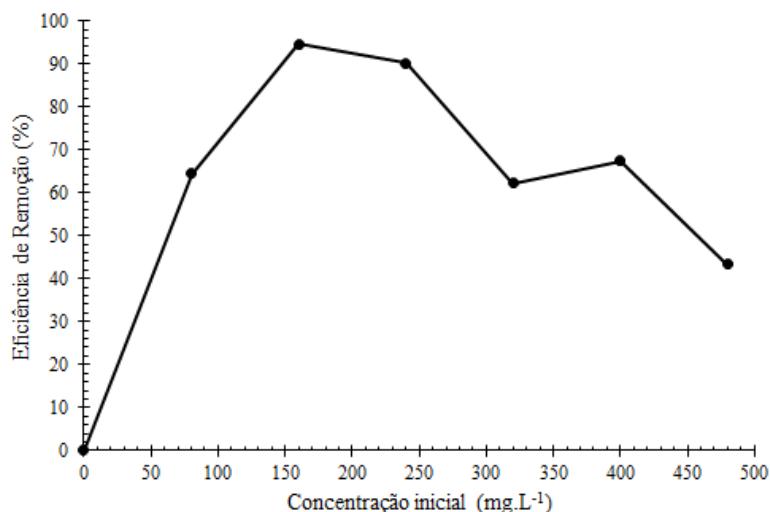


Figura 9: Efeito da concentração inicial sobre a biossorção de HFO pela *Eichhornia crassipes* in natura

Constatou-se que a eficiência de remoção máxima de óleo, igual a $94,79 \pm 0,73\%$, foi alcançada com a concentração inicial de 160 mg.L^{-1} . Nesta concentração inicial, obteve-se uma concentração final de $8,65 \text{ mg.L}^{-1}$, valor também inferior a 20 mg.L^{-1} para óleos minerais, limite estabelecido pela Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011). De acordo com a literatura, com outras biomassas vivas, a concentração inicial de óleo mineral provocou efeitos diversos na eficiência de remoção. Em experimentos com macrófitas da espécie *Scirpus grossus*, Al-Baldawi *et al.* (2015) obtiveram remoções de 81,5, 71,4 e 66,6% em efluentes com concentrações iniciais de 0,1, 0,175 e 0,25% de óleo diesel. Por sua vez, Sanusi *et al.* (2016) identificaram que em uma concentração de 0,05% de óleo diesel, a remoção foi de 36% contra os 52% com a concentração inicial de 3% de óleo diesel. A redução da eficiência de remoção observada em concentrações iniciais maiores que 160 mg.L^{-1} , retratado na Figura 9, pode estar associada à inibição das atividades metabólicas das macrófitas causada pelo excesso de óleo mineral (AL-BALDAWI *et al.*, 2015).

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos descrito neste trabalho foi possível concluir que:

A *Eichhornia crassipes* apresenta características que a torna favorável para a biossorção de óleos minerais, podendo a macrófita ser aplicada tanto como matéria prima na confecção de biossorvente seco como na aplicação direta das baronesas vivas em sistemas de tratamento;

A determinação da densidade e da viscosidade comprovaram que o óleo mineral estudado é classificado como combustível pesado;

Em termos de tempo de contato, a biossorção de óleo mineral pela *Eichhornia crassipes* é mais eficiente quando o tratamento é realizado durante, no mínimo, 2 horas, quando se atingiu uma remoção de 83,39% e uma concentração final de 13,29 mg.L⁻¹;

A concentração inicial exerce um papel importante na biossorção de óleo mineral pelas baronesas, sendo 160 mg.L⁻¹ a concentração responsável pela eficiência máxima de 94,79% nos testes realizados, reduzindo a concentração final para 8,65 mg.L⁻¹;

Além da concentração inicial correspondente à máxima eficiência, os ensaios de equilíbrio demonstraram que em concentrações altas a biossorção de óleo mineral é comprometida, provavelmente devido ao efeito tóxico do poluente nas macrófitas;

Portanto, com base nos resultados, a aplicação da *Eichhornia crassipes* é mais indicada no tratamento de efluentes com concentrações inferior a 160 mg.L⁻¹. No caso de sistemas dedicados a tratar efluente com concentrações maiores, é indicado o uso das baronesas na etapa de polimento. Desta forma, é possível garantir que a concentração de óleo mineral ao final do tratamento esteja de acordo com o exigido pela legislação ambiental vigente, Resolução CONAMA 430/2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-BALDAWI, I. A., ABDULLAH, S. R. S., ANUAR, N., SUJA, F., MUSRIFAH, I. *Phytodegradation of total petroleum hydrocarbon (TPH) in diesel-contaminated water using Scirpus grossus*. Ecological Engineering. v. 74, p. 463-473, nov. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). F726-17: Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents for use on Crude Oil and Related Spills. West Conshohocken, 2017.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF, 2011.
- CHENG, L. H., YEH, C. F., TSAI, K. C., LEE, P. F., TSENG, T. P., HUANG, L. J., YEH, S. H., HSU, H. T., LIN, C. H., LAI, C. H., BRIMBLECOMBE, P., CHEN, M. J. *Effect of pool fire scale of heavy fuel oil on the characteristics of PAH emissions*. Fuel. v. 235, p. 933-943, ago. 2019.
- DONG, T., CAO, S., XU, G. *Highly efficient and recyclable depth filtrating system using structured kapok filters for oil removal and recovery from wastewater*. J. Hazard Mater. v. 5, p. 859-867, jan. 2017.
- EFFENDI, H., MUNAWAROH, A., AYU, I. P. *Crude oil spilled water treatment with Vetiveria zizanioides in floating wetland*. Egyptian Journal of Aquatic Research. v. 43, p. 185-193, ago. 2017.
- GARANIYA, V., McWILLIAM, D., GOLDSWORTHY, L., GHIJF, M. *Extensive chemical characterization of a heavy fuel oil*. Fuel. v. 227, p. 67-78, set. 2018.
- JAINE, J. E., MUCALO, M. R. *Measurements of wettability of catalyst support materials using the Washburn capillary rise technique*. Powder Technology. v. 276, p. 123-128, mai. 2015.
- MAHMOOD, Q., PING, Z., REHAN, S. M., ISLAM, E. U., AZIM, M. R., HAYAT, Y. *Anatomical studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) under the influence of textile wastewater*. Journal of Xhejiang University SCIENCE. v. 6B, p. 991-998, out. 2005.
- MIRSHAFIEE, A., REZAEE, A., MAMOORI, R. S. *A clean production process for edible oil removal from wastewater using na electroflootation with horizontal arrangement of mesh electrodes*. Journal of Cleaner Production, v. 198, p. 71-79, out. 2018.

11. NG, Y. S., CHAN, D. J. C. *Wastewater phytoremediation by *Salvinia molesta*. Journal of Water Process Engineering.* v. 15, p. 107-115, fev. 2017.
12. RAJA, M. W., ISLAM, Q. A., BASU, R. N. *Oxygen separation membrane derived from aquatic weed: A novel bio-inspired approach to synthesize $BaBi_{0.2}Co_{0.35}Fe_{0.45}O_{3-\delta}$ perovskite from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). Journal of Membrane Science.* v. 522, p. 168-174, set. 2016.
13. RANI, M. J., MURUGAN, M., SUBRAMANIAM, P., SUBRAMANIAN, E. *A study on water hyacinth *Eichhornia crassipes* as oil sorbent. Journal of Applied and Natural Science.* v. 6, p. 134-138, abr. 2014.
14. RIBEIRO, T. H., SMITH, R. W., RUBIO, J. *Sorption of oils by the nonliving biomass of a *Salvinia* sp. Environmental Science Technology.* v. 34, p. 5201-5205, nov. 2000.
15. ROMERO-GUZMÁN, E. T., REYES-GUTIÉRREZ, L. R., MARÍN-ALLENDE, M. J., GONZÁLEZ-ACEVEDO, Z. I., OLGUÍN-GUTIÉRREZ, M. T. *Physicochemical properties of non-living water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lesser duckweed (*Lemna minor*) and their influence on the As(V) adsorption processes. Chemistry and Ecology.* v. 29, p. 459-475, mar. 2013.
16. ROY, T. K., MONDAL, N. K. *Biosorption of Congo Red from aqueous solution onto burned root of *Eichhornia crassipes* biomass. Applied Water Science.* v. 7, p. 1841-1854, jul. 2017.
17. SANUSI, S. N. A., HALMI, M. I. E., ABDULLAH, S. R. S., HASSAN, H. A.; HAMZAH, F. M., IDRIS, M. *Comparative process optimization of pilot-scale total petroleum hydrocarbon (TPH) degradation by *Paspalum scrobiculatum* L. Hack using response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANNs). Ecological Engineering.* v. 97, p. 524-534, dez. 2016.
18. WAHI, R., ABDULLAH, L. C., YAW, T. C. S., NGAINI Z.; MOBAREKEH, M. N. *Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: an overview. Separation and Purification Technology.* v. 113, p. 51-63, jul. 2013.
19. YANG, X., CHEN, S., ZHANG, R. *Utilization of two invasive free-floating aquatic plants (*Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes*) as sorbents for oil removal. Environmental Science and Pollution Research.* v. 21, p. 781-786, jan. 2014.
20. YIN, T., ZHANG, X., LIU, X., WANG, C. *Resource recovery of *Eichhornia crassipes* as oil superabsorbent. Marine Pollution Bulletin.* v. 118, p. 267-274, mai. 2017.