

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## TRATAMIENTO DA ÁGUA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO ATRAVÉS DE PROCESSOS COMBINADOS

Érica Tatiane Rodrigues Mendonça<sup>1</sup>  
Joelma Morais Ferreira<sup>1</sup>  
\* Maurício Alves da Motta Sobrinho<sup>1</sup>

### TREATMENT OF OIL WATER PRODUCTION THROUGH COMBINED PROCESSES

Recibido el 18 de octubre de 2012; Aceptado el 27 de marzo de 2012

#### Abstract

Petroleum exploration is an essential activity to modern society, however its supply for world demand has been harmful to environment, mainly due the oil produced water. Produced water is the effluent associated to oil and gas production during their extraction from the well and it is considered to be the wastewater that has the hugest volume of all extraction and production processes. Therefore, this wastewater needs to pass through treatments before its final disposal to follow either legal requirements for disposal in the environment (CONAMA 430/2011) or technical requirements for water injection in oil wells. As an alternative to the treatments for produced water, this research used flotation and sorption processes. The sorption process uses a natural sorbent (*Eichhornia crassipes*), also known as Baronesa. This study is based on two factorial planning  $2^3$  with center point. One factorial planning was used to study how the variables temperature, time and stirring influences on COD in the flotation process. The other factorial planning was used to study how the variables time, mass of sorbent and stirring influences on COD in the sorption process. Then, a statistical evaluation of the results obtained from regression models, analysis of variance, Pareto charts and response surfaces was made. Using the flotation process, the best results were a reduction of about 75% in COD and 51% in TOG and using the sorption process, the best results were a reduction of more than 50% in COD and about 58% in TOG.

**Key Words:** flotation, adsorption, petroleum exploration.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

\* *Autor correspondente:* Lab. Interdisciplinar de Meio Ambiente - Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de Pernambuco. R. Prof. Arthur de Sá, s/n. Cidade Universitária – Recife – PE. CEP 50.740-521. Brasil. Email: [mottas@ufpe.br](mailto:mottas@ufpe.br)

## Resumo

A exploração do petróleo é uma atividade essencial para a sociedade moderna, porém o suprimento de sua demanda mundial tem causado sérios danos ambientais, principalmente devido à água de produção, um efluente associado ao óleo e gás produzidos durante as atividades de extração do petróleo e que é considerado o rejeito de maior volume em todo o processo de exploração e produção de petróleo. Assim, esse rejeito necessita de tratamentos antes de sua disposição final, para atender a requisitos legais para descarte no meio ambiente (CONAMA) ou a requisitos técnicos para injeção em poços de petróleo. Como alternativa ao tratamento da água de produção, a presente pesquisa recorreu aos processos de flotação e sorção usando a planta aquática *Eichhornia crassipes*, conhecida como Baronesa. O estudo realizado se baseou em dois planejamentos fatoriais  $2^3$  com ponto central, sendo um para o estudo da influência das variáveis tempo, temperatura e agitação sobre a DQO no processo de flotação, e o outro para o estudo das variáveis tempo, massa de sorvente e agitação sobre a DQO no processo de sorção. Em seguida, fez-se uma avaliação estatística dos resultados obtidos através de modelos de regressão, análises de variância, gráficos de Pareto e superfícies de resposta. Nos melhores resultados para o processo de flotação, obteve-se uma redução de DQO de aproximadamente 75% e redução do TOG de aproximadamente 51%. Já para o processo de sorção, com os melhores resultados obteve-se uma redução na DQO superior a 50% e redução de TOG de aproximadamente 58%.

**Palavras chave:** flotação, adsorção, exploração de petróleo.

## Introdução

A exploração do petróleo é uma atividade essencial para a sociedade moderna, porém, o suprimento de sua demanda mundial tem causado danos ao meio ambiente. Dentre estes destaca-se o impacto provocado pela água de produção, efluente associado ao óleo e gás produzidos durante as atividades de extração do petróleo e que é obtido em grande quantidade. Duarte *et al.* (2004) afirmam que a água de produção é o principal efluente gerado dentro da atividade petrolífera, no qual grandes volumes de águas salinas são produzidas juntamente com o petróleo. Já Henderson *et al.* (1999) citam que durante a vida econômico de um poço, o volume desta água pode chegar a exceder dez vezes o volume do óleo produzido. Damasceno *et al.* (2007) citam que os efluentes das indústrias petrolíferas, ao serem lançados em corpos d'água, provocam desequilíbrio no ambiente, por transportarem compostos de difícil degradação.

A composição da água de produção de petróleo é muito complexa e, dependendo da sua origem, pode conter uma grande variedade de substâncias químicas, as quais requerem tratamentos antes de sua disposição final ou descarte no meio ambiente, de modo a atender aos requisitos legais (CONAMA 357/2005, 393/2007 e 430/2011) ou aos requisitos técnicos para injeção em poços de petróleo (GOMES, 2009).

Segundo Bezerra (2004), as águas de produção devem ser tratadas de modo a se extrair a máxima quantidade de óleo possível e diminuir a concentração dos demais constituintes, para atender, segundo Gomes (2009), aos requisitos de disposição do efluente, sejam esses legais

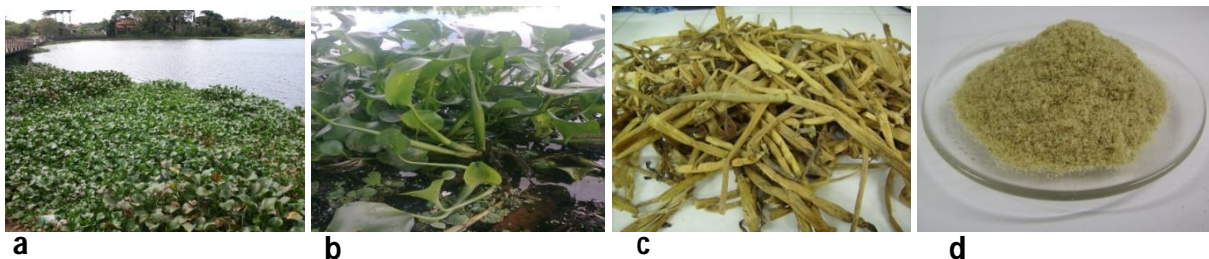
(impostos pela legislação específica que protege o meio ambiente, no caso o CONAMA) ou operacionais (definidos pelas características do reservatório onde se pretende injetar a água no processo de recuperação). Para tanto, o efluente pode receber variados tratamentos, mas que se resumem basicamente a quatro tipos: físicos, físico-químicos (mais convencionais), fotoquímicos ou biológicos, ou ainda uma combinação entre eles, pois, segundo Curbelo (2002), o tratamento das águas contaminadas com petróleo não se limita a uma única operação unitária. Em geral, constitui um conjunto dessas operações que são estabelecidas de acordo com a concentração inicial de óleo e a concentração final desejada.

Segundo Silva (2008), a principal vantagem do processo de flotação é a sua eficiência associada a um baixo custo de operação em relação aos outros métodos de separação e, por isso, atualmente ele é aplicado nos mais diversos tipos de separação. Já Tavares (2009), cita que apesar do processo de sorção ser alvo de diversas pesquisas, o tratamento de águas e efluentes por ele ainda não é largamente empregado nas indústrias, devido ao elevado custo dos materiais encontrados comercialmente (como resinas de troca iônica, resinas quelantes e carvão ativado).

A fitorremediação tem recebido atenção crescente depois da descoberta de plantas hiperacumuladoras que são capazes de acumular, translocar e concentrar elevadas quantidades de certos elementos tóxicos. Plantas, tanto terrestres quanto aquáticas, são usadas para remediar contaminantes de solos e de águas residuais. Um certo número de espécies de plantas aquáticas (aguapé, espinafre-d'água, samambaias) têm sido estudado para a remoção de contaminantes tóxicos, como Zn, Cd, Cu, Pb, Cr, Hg, Fe, As entre outros (FAVAS *et al.*, 2012).

### Materiais e Métodos

A primeira etapa do trabalho consistiu na coleta da *E. crassipes* (baronesa) no açude de Apipucos (próximo ao vertedouro), localizado na cidade de Recife-PE (Figura 1a). Em seguida foi iniciado o pré-tratamento da biomassa, consistindo das etapas de lavagem (Figura 1b), separação das partes, secagem (Figura 1c), moagem e peneiramento do material (Figura 1d).



**Figura 1.** Coleta da baronesa no açude de Apipucos (Recife-PE) (a), baronesa coletada no açude (b), baronesa seca (c) e baronesa triturada e classificada (d)

Este pré-tratamento foi para remoção de contaminantes oriundos do local onde a baronesa foi coletada e para aumento da área superficial. Foram separadas as raízes, os caules e as folhas da baronesa, porém prosseguiu-se com o tratamento apenas do caule e das folhas, de acordo com Carvalho (2005). O material seco foi cortado, triturado em um moinho de facas da FRITSCH modelo PULVERISETTE 14 e classificado em peneiras da série de Tyler.

O efluente usado no trabalho foi colhido no do poço 7-SER10D – RNS da Petrobras, que faz parte da exploração do campo petrolífero de Serra (contido no Município de Macau-RN), presente na Bacia Potiguar. Esse é um poço exploratório de produção de óleo e produz desde 2003.

A caracterização básica do efluente bruto consistiu na determinação de pH, condutividade, turbidez, cloretos, sólidos totais dissolvidos (STD), sulfetos, teor de óleos e graxas (TOG) e demanda química de oxigênio (DQO). Todos os métodos utilizados para a determinação destes parâmetros foram seguidos de acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2003).

Como a eficiência do processo de flotação depende de vários fatores, nessa etapa da pesquisa foi realizado um estudo para verificar a influência das variáveis: Tempo (t), Temperatura (T) e velocidade de agitação (A), aplicando a técnica de planejamento experimental fatorial  $2^3$  mais repetições no ponto central. Tais variáveis foram consideradas as variáveis de entrada na elaboração da matriz de planejamento experimental. Os níveis escolhidos para as variáveis de entrada encontram-se na Tabela 1. A variável resposta analisada foi a porcentagem de redução da DQO.

**Tabela 1.** Níveis das variáveis de entrada do planejamento fatorial completo  $2^3$  para o processo de flotação

Variáveis	Nível (-1)	Ponto central (0)	Nível (+1)
Tempo (h)	0.5	1.5	2.5
Temperatura (°C)	27	36	45
Velocidade de agitação (rpm)	300	675	1050

Os ensaios de flotação em batelada foram realizados adicionando-se 300 mL do efluente (Água de Produção) bruto a béqueres de 600 mL, mantendo-os com uma aeração constante de 1.76 L/h fornecida por compressores de ar durante o período de tempo determinado, sob a agitação e temperatura estabelecidas para cada ensaio. Um agitador magnético com chapa aquecedora (Quimis Q261) foi o responsável pela agitação e aquecimento das amostras durante a flotação.

Em posse dos resultados do experimento de flotação, escolheu-se o ensaio que forneceu menor DQO final (maior porcentagem de redução da DQO) para ser o efluente a ser tratado pelo processo de sorção com a baronesa. Para tanto, precisou-se tratar um maior volume da água de produção (3.0 L) para avaliar o remoção do TOG.

Já para o processo de sorção usando a *E. crassipes* como adsorvente, foi analisada a influência das seguintes variáveis: tempo (t), massa do material adsorvente (M) e velocidade de agitação (A), também aplicando a técnica de planejamento experimental fatorial completo  $2^3$  mais ponto central, cuja variação dos níveis para cada variável está apresentada na Tabela 2. Assim como no primeiro planejamento, todos os ensaios foram realizados em duplicatas.

**Tabela 2.** Níveis das variáveis de entrada do planejamento fatorial completo  $2^3$  para o processo de adsorção com a baronesa

Variáveis	Nível (-1)	Ponto central (0)	Nível (+1)
Tempo (h)	0.5	1.5	2.5
Quantidade de sorvente (g)	0.5	1.5	2.5
Velocidade de agitação (rpm)	200	300	400

Para realização dos experimentos, adicionou-se a devida massa de baronesa (prevista pelo planejamento experimental para cada ensaio) a erlenmeyers de 125 mL. Em seguida adicionou-se 25 mL da água de produção pré-tratada pela flotação. A mistura ficou sob agitação numa mesa agitadora Quimis modelo Q-225M durante o período de tempo determinado e sob a agitação necessária. Após o término de cada um destes ensaios, determinou-se a DQO final e também a redução percentual desse parâmetro. Finalmente verificou-se o ensaio com melhores resultados e reproduziu-o, de modo a analisar o TOG final.

Foi realizado o tratamento estatístico dos dados com o auxílio do software *Statistica for Windows versão 5.0*, calculando-se efeitos principais e de interação e construindo as superfícies de resposta.

## Resultados

### Caracterização do Efluente

Na Tabela 3 encontram-se os resultados dos parâmetros analisados na etapa de caracterização do efluente bruto. Alguns dos valores encontrados diferiram bastante dos que constam na literatura (CAMPOS *et al.*, 2001; VIEIRA *et al.*, 2003) porém isso se deve possivelmente ao fato da amostra analisada nesta pesquisa não ser uma água de formação e sim o resultado de sua mistura com fluido de injeção (a fim de manter a pressão da zona produtora e,

consequentemente, a produção de óleo devido à maturidade do poço). Pois, o fluido de injeção recebe várias substâncias químicas, tais como, anticorrosivos, anti-incrustantes, desemulsificantes, aditivos que consomem oxigênio, bactericidas entre outras substâncias que podem alterar as propriedades da água de formação.

**Tabela 3.** Resultados da caracterização do efluente bruto

Parâmetro	Valor médio de três análises
pH	8.14
Condutividade (mS/cm)	2.84
Turbidez (NTU)	855
Cloretos (mg/L)	4.438
STD (mg/L)	2130
Sulfetos (mg/L)	11
TOG (mg/L)	29
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	414

O pH da água de produção, por exemplo, encontrado por Campos *et al.* (2001) foi de 6.8 e o pH encontrado por Vieira *et al.* (2003) foi 6.7, tais valores indicam uma leve acidez, diferindo do medido (Tabela 3), que apresentou valor superior, indicando que a água de produção analisada possui propriedades básicas.

Os parâmetros TOG e DQO apresentaram valores menores que os encontrados na literatura, como Campos *et al.* (2001) e Vieira *et al.* (2003) que encontraram valores de TOG de 220 mg/L e 79 mg/L e DQO de 2100 mg/L e 790 mg/L respectivamente. Essa diferença provavelmente foi devido ao tratamento primário que o fluido recebeu no separador trifásico. Já os valores obtidos de condutividade, turbidez, TDS e concentração de cloretos e de sulfetos não mostraram diferença significativa aos já referenciados na literatura.

#### Planejamento Experimental Fatorial da Flotação

O resultado obtido pelo planejamento experimental fatorial para o tratamento da água de produção por flotação indicou que os experimentos para as quais se manteve as variáveis tempo e agitação em seus níveis superiores (tempo de 2.5h e agitação de 1050 rpm) foram os que apresentaram maior redução da DQO 75%. Pode-se observar também que a temperatura pouco influenciou nos resultados (na faixa estudada), uma vez que ela foi a única variável alterada nos experimentos 1 e 3 e, ainda assim, obteve-se resultados similares.

O modelo empírico obtido pelo método dos mínimos quadrados para os resultados dos experimentos está descrito na Equação 1, cujos parâmetros são estatisticamente significativos a 95% de confiança

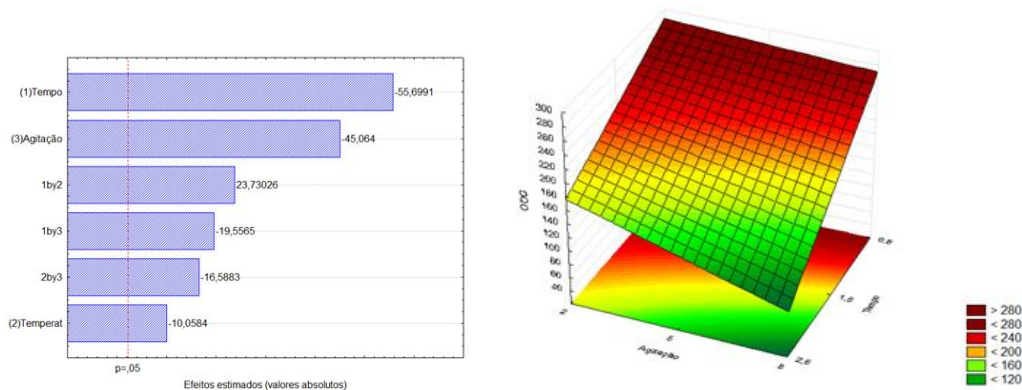
$$DQO = 202.37 - 51.36 t - 9.27 T - 41,54 A + 21.88 t T - 18.03 t A - 15.92 T A \quad \text{Equação (1)}$$

para a qual: t=tempo; T=temperatura e A=velocidade de agitação

Analisando-se a Equação 1, pode-se concluir que, com relação aos efeitos principais, as variáveis tempo, temperatura e agitação influenciam positivamente na remoção da DQO, ou seja, quanto maiores os valores dessas variáveis, menor é o valor final da DQO e, portanto, maior é a sua redução obtida no experimento. Vale ressaltar que o modelo de regressão é um modelo local, ou seja, modelo aplicável apenas à faixa experimental estudada, limitando extrapolações.

Através da análise de variância (ANOVA) para o modelo de redução de DQO, pôde-se verificar que o F calculado (17.54) foi bem maior que o valor tabelado de  $F_{6,11}$ , que foi de 3.09 a 95% de confiança. Sendo assim, a hipótese nula é rejeitada e conclui-se que a equação de regressão é estatisticamente significativa, segundo Barros Neto *et al.* (2003). A porcentagem de variação explicada pela regressão foi 90.54%, enquanto que a porcentagem máxima de variação explicada pelo modelo foi 99.85%. Tal resultado é satisfatório, mas deixa uma parcela de resíduos de 9.31%, que se devem à falta de ajuste ou a erros experimentais.

O gráfico de Pareto (Figura 2a), mostra de forma clara e rápida a estimativa dos efeitos principais para as variáveis tempo, temperatura e agitação e efeitos de interação. Neste gráfico, as variáveis cujos retângulos estão à direita da linha pontilhada vermelha são as que apresentam efeitos significativos a 95% de confiança. Facilmente se observa que a variável de maior influência sobre a redução da DQO foi o tempo e secundariamente a agitação, enquanto que a temperatura pouco influenciou, confirmando a análise anteriormente apresentada.



**Figura 2.** Diagrama de Pareto representando a estimativa dos efeitos provocados pelas variáveis tempo, temperatura e agitação e suas interações no processo de flotação estudado (a) e Gráfico de superfície de resposta mostrando a DQO em função das variáveis agitação e tempo no processo de flotação (b)

A Figura 2b mostra a superfície de resposta descrita pela Equação 4, na qual a DQO é representada em função do tempo e da agitação. Analisando esta figura, pode-se notar que as maiores eficiências (redução da DQO) são obtidas quando a faixa experimental é deslocada para maiores valores de agitação e tempo (o que já está indicado pelos sinais dos coeficientes destas variáveis na Equação 4).

Após a conclusão de que o ensaio com todas as variáveis em seu nível superior foi o que apresentou maior eficiência na redução da DQO, reproduziu-se esse experimento sob as mesmas condições, porém para uma quantidade maior de efluente. O valor final da DQO após esse processo de flotação sob agitação de 1050 rpm e temperatura de 45°C durante 2.5 horas foi de 97.28 mg de O<sub>2</sub>/L, e o de TOG foi de 14.4 mg/L, indicando uma redução na DQO de aproximadamente 76% e no TOG de aproximadamente 51%. Analisando apenas o TOG, essa água já poderia ser descartada em corpos receptores, para isso a água de produção deve conter no máximo 20.0 mg/L de óleos e graxas (Resoluções 357/2005 e 430/2011 do CONAMA).

#### Planejamento da Adsorção

Em relação ao planejamento fatorial do processo adsorptivo da água de produção oriunda do processo de flotação pelo caule da baronesa triturada, observou-se que as maiores eficiências na redução da DQO (valores superiores a 50%) foram obtidas quando se utilizou todas as variáveis em seus níveis superiores. Além disso, percebeu-se que a massa da baronesa usada no processo influencia de maneira significativa no valor final da DQO obtido, pois, ao comparar os resultados dos experimentos nos quais a única diferença é a massa da baronesa usada, a redução da DQO caiu de mais de 50% nos experimentos com maior massa, enquanto que nos experimentos com menor massa, as reduções de DQO obtidas foram em torno de 10%.

Novamente com o auxílio do software *Statistica for Windows* versão 5.0, foi realizado o tratamento estatístico dos resultados obtidos no planejamento experimental fatorial 2<sup>3</sup> para o processo de sorção usando a *E. crassipes* como sorvente para otimização do tratamento de água de produção. O modelo empírico obtido pela regressão para os resultados dos experimentos é descrito pela Equação 2, cujos parâmetros são estatisticamente significativos a 95% de confiança.

$$DQO = 72.71 - 0.686 t - 18.61 M - 3.98 A - 1.79 t M + 2.54 t A + 2.02 M A \quad \text{Equação (2)}$$

na qual: t=tempo; T=temperatura e A=velocidade de agitação

Analisando os sinais da Equação 2, pode-se concluir que, com relação aos efeitos principais, as variáveis tempo, agitação e massa influenciam positivamente na remoção da DQO, pois, quanto maiores os valores dessas variáveis, menor é o valor final da DQO e, portanto, maior é a sua

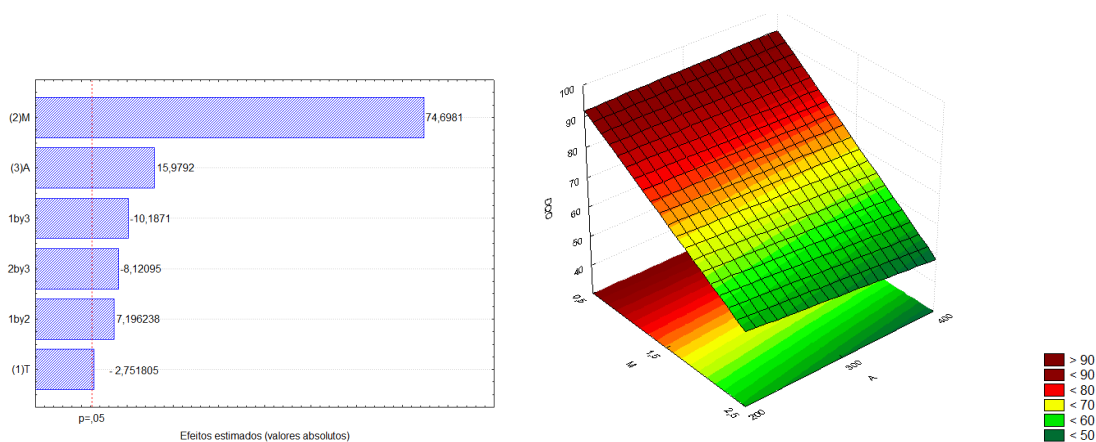


redução obtida. Também é possível verificar que o tempo pouco influencia, já que o seu coeficiente na Equação 2 é muito baixo, como variável isolada. Novamente é importante ressaltar que o modelo de regressão representado pela Equação 2 é um modelo aplicável apenas à faixa experimental estudada.

A análise de variância (ANOVA) mostrou que o modelo é estatisticamente significativo e preditivo de acordo com Barros Neto *et al.* (2003) pois a razão entre Teste F Calculado (58.49) e o Tabelado (3.09) foi superior a 5. A porcentagem de variação explicada pela regressão foi 97.50%, enquanto que a porcentagem máxima de variação explicada foi de 99.86%.

Para o tratamento com a Baronesa, o gráfico de Pareto (no nível de 95% de confiança) é mostrado na Figura 3a, através da qual pode-se verificar a enorme influência da massa sobre o valor final da DQO.

Ainda no gráfico da Figura 3a, pode-se observar a influência pouco significativa do tempo, provavelmente devido à saturação da baronesa com os materiais sorvidos, assim mesmo para grandes tempos de contato entre a baronesa e o efluente, não se aumentaria significativamente a eficiência do processo, pois, a partir de um determinado momento a baronesa não consegue mais sorver as impurezas presentes na água. Segundo o gráfico da Figura 3a, a agitação também influencia no processo, além das interações em pares entre todas as variáveis. Já a Figura 3b, mostra a superfície de resposta, na qual é mostrada a redução da DQO em função da agitação e da massa de baronesa utilizada. Novamente verifica-se a grande influência da massa da *E. crasipes*, seguida da agitação, cujo aumento favorece a redução da DQO.



**Figura 3.** Diagrama de Pareto representando a estimativa dos efeitos provocados pelas variáveis tempo, massa de baronesa e agitação e suas interações no processo de sorção estudado (a) e Gráfico de superfície de resposta mostrando a DQO em função das variáveis massa de Baronesa e agitação no processo de sorção(b)

O valor final da DQO após esse processo de sorção sob agitação de 400 rpm, usando 2.5 g de baronesa e deixando efluente e sorvente em contato por 2.5 h foi de 47 mg de O<sub>2</sub>/L, e o de TOG foi de 6.08 mg/L, indicando uma redução de aproximadamente 51% na DQO e de 58% no TOG. Apesar da significativa redução no TOG da água de produção, ela ainda não se apresenta em boas condições para ser usada como fluido de injeção.

#### Redução Total da DQO e do TOG

A eficiência máxima total, ou seja, considerando os melhores resultados nos processos de flotação e sorção em conjunto, no tratamento de água de produção de petróleo obtida no trabalho foi de mais de 88% na redução da DQO e de aproximadamente 80% na redução de TOG. Tais resultados se mostraram bastante satisfatórios, porém, como analisado no item anterior, ainda se pode investigar melhores condições de operação a fim de obter um valor final de TOG que enquadre o efluente tratado na classificação como um bom fluido de injeção.

#### **Conclusões**

Com o tratamento por flotação, a DQO do efluente sofreu uma redução superior a 75% nas melhores condições experimentais, para as quais se manteve as variáveis tempo e agitação em seus níveis superiores (tempo de 2.5h e agitação de 1050 rpm). Além disso, obteve-se uma redução de 51% no TOG. Pôde-se constatar também reduções superiores a 51% na DQO e de 58% no TOG, quando se realizou os experimentos de sorção em suas melhores condições experimentais. A avaliação estatística dos modelos empíricos adotados para a redução da DQO para ambos os processos mostrou que as equações de regressão são estatisticamente significativas e os modelos estão bem ajustados aos dados experimentais, a 95% de confiança, na faixa analisada. Além disso, obteve-se no trabalho uma redução total de mais de 88% na DQO e de aproximadamente 51% no TOG, com valor final de 47 mg de O<sub>2</sub>/L para DQO, e de 6.08 mg/L para TOG. Indicando que a água pode ser descartada segundo as normas do CONAMA 357/2005, 393/2007 e 430/2011, porém ainda não é classificada como um bom material para ser usado como fluido de injeção. Estudos posteriores analisarão melhores condições de realização dos experimentos, a fim de obter melhores resultados na redução do TOG.

**Agradecimentos.** Os autores agradecem ao apoio recebido do PRH-28 (ANP-MCT), CNPq, FACEPE, a PETROBRÁS pelo fornecimento da água de produção, ao Lab. de Engenharia Ambiental pelas determinações do TOG e ao Lab. de Tec. Mineral do Depto. de Eng. de Minas da UFPE pela moagem e classificação das baroneas.

## Referencias bibliográficas

- APHA. American Public Health Association (2003) Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th.ed. New York: APHA, AWWA, WPCR.
- Barros Neto, B; Scarminio, I. S.; Bruns, R. E. (2003) Como fazer experimentos. Editora da UNICAMP, Campinas.
- Bezerra, M. A. dos S. (2001) Águas de produção de petróleo com vistas a sua utilização na agricultura e geração de vapor. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- Campos, J. C.; Nobrega, R.; Sant'anna Júnior, G. L. (2001) tratamento de água de produção de petróleo em reator biológico do tipo air-lift, em *21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 16 a 21 de setembro. João Pessoa – PB.
- Carvalho, M. N. (2005) Avaliação do Processo de Remoção de Ferro em Água de Origem Subterrânea por Adsorção com Materiais Naturais. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília, DF, 2005.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Resolução nº 393, de 8 de agosto de 2007. Brasília, DF, 2007.
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Brasília, DF, 2011.
- Curbelo, F. D. da S. (2002) Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN .
- Favas, P.J.C., Pratas, J., Prasad, M.N.V. (2012) Accumulation of arsenic by aquatic plants in large-scale field conditions: Opportunities for phytoremediation and bioindication. *Science of the Total Environment*, **433**, 390–397.
- Gomes, E. A. (2009) Tratamento combinado da água produzida de petróleo por eletroflotação e processo Fenton. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Univ. Tiradentes, Aracaju, SE.
- Henderson, S.B.; Grigson, S.J.W.; Jonhson, P. Roddie, B.D. (1999) Potencial Impact of Production Chemicals on the Toxicity of Produced Water Discharges from North Sea Oil Platforms. *Marine Pollution Bulletin*, **38**(12), 1141-1151.
- Silva, P. K. L. (2008) Remoção de óleo da água de produção por flotação em coluna utilizando tensoativos de origem vegetal. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- Tavares, S. R. de L. (2009) fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 415 p.
- Vieira, D. S.; Cammarota, M. C.; Camporese, E. F. S. (2003) Redução de Contaminantes Presentes na Água de Produção de Petróleo, em *2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*. 15 a 18 de junho. Rio de Janeiro - RJ.