

### **III-109 - APLICAÇÃO DE ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DO ATERRO SANITÁRIO DE CARUARU, BRASIL**

**Miguel Antônio Pires Kelm**

Possui graduação em Engenharia Ambiental pelo Centro Universitário Tabosa de Almeida (2016). Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (2019).

**Daiany Silva dos Santos Schodermayr**

Possui graduação em Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (2012). Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade de Pernambuco (2015). Atualmente é doutoranda em Engenharia Civil na Universidade Federal de Pernambuco.

**Mauricio Alves da Motta Sobrinho<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Católica de Pernambuco (Unicap); Doutorado em Engenharia de Processos pelo Institut National Polytechnique de Lorraine (França); Professor Associado da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Pesquisador 1D CNPq.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife, PE, Brasil, CEP: 50670-901. E-mail: [miguelkelm2@gmail.com](mailto:miguelkelm2@gmail.com)

#### **RESUMO**

Neste trabalho foi investigado o tratamento de lixiviado de aterro sanitário através da eletrocoagulação, utilizando alumínio como eletrodo. Os testes foram realizados seguindo um planejamento fatorial  $2^3$  com ponto central a fim de verificar quais variáveis poderiam influenciar no processo de tratamento do lixiviado. As variáveis independentes estudadas foram pH, voltagem e adição de cloreto. O tempo de tratamento foi de 15 min. Posteriormente a DQO e cor foram verificadas de modo a entender a eficiência do processo. Os resultados mostraram remoção de cor de até 67% e de remoção de DQO de até 52%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Poluição, eletrofloculação, tecnologia ambiental, lixiviados de aterro sanitário.

#### **INTRODUÇÃO**

O lixiviado de aterro sanitário, também conhecido como chorume, é um líquido de coloração escura produzido através da decomposição de matéria orgânica o qual possui características recalcitrantes e de alto potencial poluidor.

Quando descartado sem tratamento prévio causam diversos impactos ambientais como toxicidade para a biota existente no solo e comunidades aquáticas, além da diminuição do oxigênio dissolvido e eutrofização de corpos d'água, alterando a qualidade deles (PANDE; SINHA; AGRAVAL; 2015); (EL-SALAN; ABU-ZUID; 2015). O tratamento do lixiviado é desafiador, pois é um efluente que apresenta alta concentração de matéria orgânica refratária, amônia e compostos tóxicos orgânicos e inorgânicos, além de elevado pH e valores de cor (MORAVIA, 2010).

São utilizados diversos métodos de tratamentos para lixiviados dentre eles os biológicos (lodos ativados, lagoas de estabilização, filtros biológicos, reatores anaeróbios) físico-químicos (flotação, floculação, precipitação química, oxidação química, troca iônica, tratamento eletroquímico, adsorção) e os Processos Oxidativos Avançados (Fenton, foto-fenton).

O processo de eletrocoagulação vem se mostrando uma alternativa interessante para tratamento de águas residuárias devido a sua simplicidade e eficiência (LI et al, 2011). Por meio da aplicação de uma corrente em um par de eletrodos mergulhados no efluente a ser tratado, há a geração de coagulantes através da dissolução de um eletrodo de sacrifício, o ânodo (FERNANDES et al, 2015). Os íons são atraídos por partículas coloidais, neutralizando sua carga e formando partículas (ELNENAY, et al. 2016).

Pesquisas realizadas mostram a eficiência desse processo no tratamento de lixiviados: Huda et al. (2017) alcançou remoções de cor e DQO em 82,7% e 45,1%, respectivamente.

Tendo em vista a busca por alternativas ao tratamento de lixiviados de aterro sanitário, o presente trabalho procurou aplicar o processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio como tratamento de lixiviado de aterro sanitário.

## **METODOLOGIA**

### **COLETA E ARMAZENAMENTO**

O lixiviado foi coletado no aterro sanitário do município de Caruaru, localizado no agreste de Pernambuco, sob as coordenadas de latitude -08°14'23,15" e longitude: -35 59' 43,54", datum SIRGAS 2000; o empreendimento tem como ponto de referência o Polo Comercial de Caruaru, cuja principal via de acesso se dá pela BR 104, sentido Caruaru. Atualmente, o aterro encontra-se encerrado.

o material foi coletado na entrada da lagoa de acumulação de lixiviados do aterro sanitário do município de Caruaru e armazenado em bombona de 10 litros, mantido refrigerado em 4°C.

### **CARACTERIZAÇÃO**

Os experimentos foram executados nos laboratórios do Grupo de Processos e Tecnologias Ambientais (GPTA), localizado no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), campus Recife. Os parâmetros utilizados na caracterização do lixiviado coletado foram: pH, cor, turbidez, Sólidos Totais, Fixos e Voláteis, Demanda Química de Oxigênio (DQO, método colorimétrico) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), realizados seguindo as recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005). A determinação da cor foi realizada através do colorímetro MERK spectroquant modelo Nova 60, enquanto que para a determinação de turbidez foi utilizado um turbidímetro da marca

### **ENSAIOS DE ELETROCOAGULAÇÃO**

O sistema de eletrocoagulação consistiu no uso de um par de eletrodos de alumínio, nas dimensões de 112 x 21 x 0,1mm, confeccionados a partir de latas de refrigerantes, devidamente decapados por lixas grão 80. A distância entre os eletrodos foi fixa em 13 mm. A fonte de alimentação utilizada foi uma do tipo universal, cuja voltagem varia de 3 a 12 V e corrente máxima de 1200 mA.

Primeiramente, foram transferidos 200 mL de lixiviado para um Becker de 600 mL. O pH foi ajustado utilizando ácido sulfúrico a 2M e hidróxido de sódio 4M. Foi adicionado cloreto de sódio (NaCl) e, então, o becker foi posicionado sobre o agitador, de marca fisatom, e os eletrodos foram mergulhados no lixiviado até 21 mm de altura. A mistura foi agitada sob velocidade 3 e imediatamente o sistema foi conectado a corrente elétrica. O processo correu durante o período de 15 minutos em todos os experimentos. Ao término do tempo de ensaio, a corrente e agitação foram interrompidas. Os ensaios ocorreram de acordo com o planejamento fatorial 2<sup>3</sup> em duplicata com ponto central (9 ensaios em duplicata), cujos níveis estudados estão mostrados na tabela 1.

**Tabela 1. Níveis do planejamento fatorial 2<sup>3</sup> com ponto central.**

Fator	-1	0	+1
pH	5,5	7	8,5
Voltagem (V)	6	7,5	9
Cloretos (mg.L <sup>-1</sup> )	500	1250	2000

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A tabela 2 apresenta os resultados da caracterização do lixiviado de Caruaru. A baixa biodegradabilidade do chorume, conforme o valor da relação DBO<sub>5</sub>/DQO (0,16), sugerem que o aterro sanitário é antigo e estável (FERREIRA, 2013), e que processos físico-químicos ou avançados são recomendados para o tratamento deste tipo de efluente (LANGE et al, 2006; LUCENA et al, 2017).

**Tabela 2. Valores dos parâmetros de caracterização do lixiviado**

Parâmetros	Valores
pH	8,21
Cor (uH)	3780
Turbidez NTU	101
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	5039
DBO5 (mg O <sub>2</sub> /L)	800
DBO5/DQO	0,16

Através da execução do planejamento experimental foram obtidos os resultados de remoção de cor e de DQO apresentados na tabela 3. Observou-se remoções de até 51% de DQO em pH 5,5, concentração de cloretos em 500 mg.L<sup>-1</sup> na voltagem 9 V (ensaio 3). Esta mesma condição removeu 67% de cor do lixiviado. Em geral, foi observada remoções de cor mais altas em condições ácidas.

Foi observado que ao aumentar a concentração de cloretos para 2000 mg.L<sup>-1</sup>, mantendo pH 5,5 e 9V, a remoção de DQO atingiu apenas 37%. Alguns autores, como Jotin et al (2012) e Huda et al (2017), ao tratar lixiviados de aterro sanitário por eletrofloculação com eletrodos de alumínio e de ferro, respectivamente, observaram que a redução da condutividade ou da concentração do NaCl aumentou o rendimento da remoção de DQO nas condições experimentadas. Wang et al (2009), ao tratar efluentes de lavanderia por eletrofloculação em eletrodos de alumínio, justificou este comportamento devido ao excesso de Cl<sup>-</sup> presente no meio, que pode formar componentes intermediários, como Al (OH)<sub>2</sub>Cl, Al (OH)Cl<sub>2</sub>, e AlCl<sub>3</sub>, diminuindo a quantidade de Al(OH)<sub>3</sub> e prejudicando assim a coagulação.

**Tabela 3. Condições dos ensaios e valores das variáveis de resposta.**

Ensaios	pH	Voltagem (V)	Cloreto (mg/L)	Média de Remoção de Cor (%)	Média de Remoção de DQO (%)
1	-1	-1	-1	52	18
2	1	-1	-1	13	8,1
3	-1	1	-1	67	51
4	1	1	-1	20	9
5	-1	-1	1	63	37
6	1	-1	1	18	15
7	-1	1	1	62	34
8	1	1	1	21	8,1
9	0	0	0	24	16

A partir dos resultados apresentados na tabela anterior foi realizada uma avaliação estatística, em que se comparou a influência dos efeitos tanto de forma isolada quanto combinados, de forma linear e quadrática, das variáveis independentes deste trabalho. Os dados foram tratados através do software Statística (versão 10) para determinação do efeito dos fatores estudados sobre o processo de tratamento e geração de um modelo que relacione as variáveis independentes com a remoção de cor e DQO. Os dados foram submetidos a Análise de Variância (ANOVA), regressão e teste F.

Foi realizada regressão linear e não linear para ambas variáveis de resposta. Os dados de remoção de Cor apresentaram ajuste melhor ao modelo quadrático, uma vez que a sua falta de ajuste foi sete vezes inferior à do modelo linear. Enquanto que, para remoção de DQO, o modelo linear apresentou melhor ajuste.

As tabelas 3 e 4, que apresentam os resultados da ANOVA para a variável remoção de cor e para remoção de DQO, respectivamente. A partir desta análise, pôde-se observar se os modelos propostos se ajustaram aos resultados obtidos. Realizou-se o teste F para validar os modelos propostos para ambas as variáveis de respostas do experimento.

**Tabela 3. Resultados ANOVA para a variável remoção de Cor (%) em lixiviado após o processo eletrofloculação.**

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade	Média Quadrática (MQ)
Regressão (R)	7948,666	7	1135,524
Resíduos (r)	74,097	10	7,410
Falta de ajuste (faj)	37,715	1	37,715
Erro Puro (ep)	36,382	9	4,0424
Total (T)	8022,763	17	
% Variação explicada: 99,076			
% Variação explicável: 99,547			

Através dos dados da tabela 3, pode-se afirmar que os resultados apresentam ajuste satisfatório ( $R^2 > 75\%$ ), uma vez que a variação explicada (99,076) é muito próxima de da variação explicável (99,547) (OLIVEIRA, 2017). Para remoção de Cor, o teste F do modelo proposto obtido pela regressão obteve os seguintes resultados: o F calculado ( $MQ_R/MQ_r$ ) foi de 153,24, valor mais de quarenta e oito vezes superior ao F tabelado ( $F_{7,10}=3,14$ ). Isso indica que o modelo é significativo estatisticamente. Contudo, realizou-se outro teste F, desta vez da falta de ajuste: o F calculado ( $MQ_{faj}/MQ_{ep}$ ) foi igual a 9,33, este valor é superior ao F tabelado ( $F_{1,9}=5,12$ ), o que indica que há falta de ajuste do modelo.

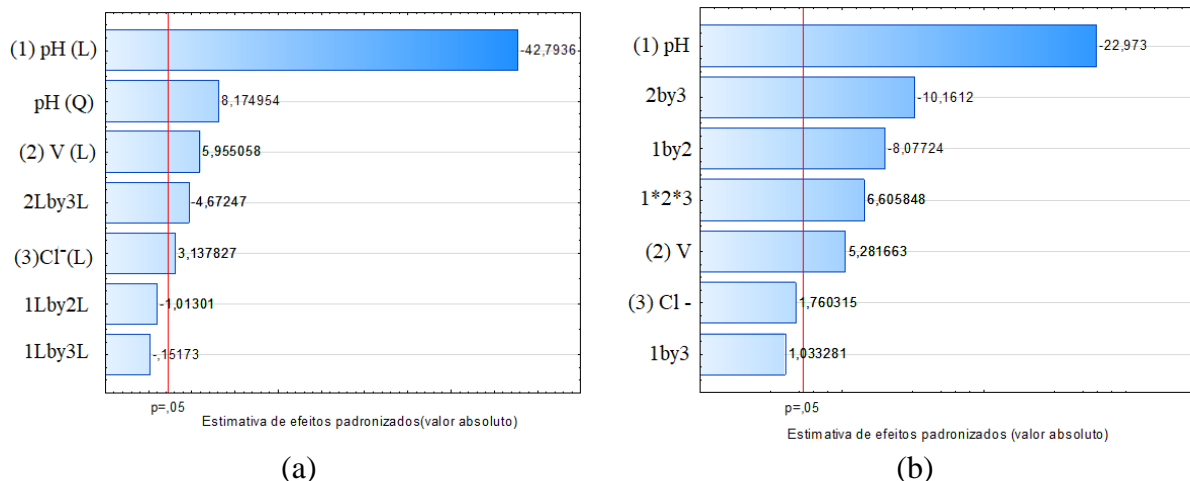
**Tabela 4. Resultados ANOVA para a variável remoção de DQO (%) em lixiviado.**

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade	Média Quadrática (MQ)
Regressão (R)	3666,348	7	523,764
Resíduos (r)	117,313	10	11,731
Falta de ajuste (faj)	74,567	1	74,567
Erro Puro (ep)	42,745	9	4,749
Total (T)	3783,661	17	
% Variação explicada: 96,899			
% Variação explicável: 98,870			

A mesma discussão se dá para tabela 4. Os resultados apresentam bom ajuste, uma vez que a variação explicada (96,899) é muito próxima de da variação explicável (98,870).

Para remoção de DQO, o teste F do modelo proposto apresentou os seguintes resultados: o F calculado ( $MQ_R/MQ_r$ ) foi de 44,65, valor mais de catorze vezes superior ao F tabelado ( $F_{7,10}=3,14$ ). Isso indica que o modelo é significativo estatisticamente. Contudo, realizou-se outro teste F, desta vez da falta de ajuste: o F calculado ( $MQ_{faj}/MQ_{ep}$ ) foi igual a 15,70, que é um valor é superior ao F tabelado ( $F_{1,9}=5,12$ ), o que supõe falta de ajuste do modelo.

Através do diagrama de Pareto, mostrados na figura 1, representam as variáveis analisadas que influenciam significativamente o processo. Na figura 1.a, para a remoção de cor, apenas a relação pH e voltagem (1Lby2L) e pH e cloretos (1Lby3L) não exerceram efeito significativo nos resultados. No figura 1.b, o diagrama de pareto mostra que somente a concentração de cloretos (Cl) e a relação pH e cloretos (1by3) não influenciou significativamente os resultados de remoção de DQO. Em ambos os casos, o pH foi o fator que exerceu o maior efeito significativo, interferindo de forma negativa (efeito negativo) sobre o processo.



**Figura 1. Diagramas de Pareto do processo de eletrofloculação para tratamento de lixiviados. O primeiro (a) aponta os fatores do processo que influenciam significativamente a remoção de cor, enquanto o segundo (b), os fatores que são significativos para remoção de DQO.**

A regressão dos resultados experimentais resultaram nos modelos das equações 1 e 2, que representam a remoção de Cor (%) e a remoção de DQO(%), respectivamente.

$$\text{Re. Cor} = 27,05 - 21,51x_1 + 12,33x_1^2 + 2,99x_2 + 1,58x_3 - 2,35x_2x_3$$

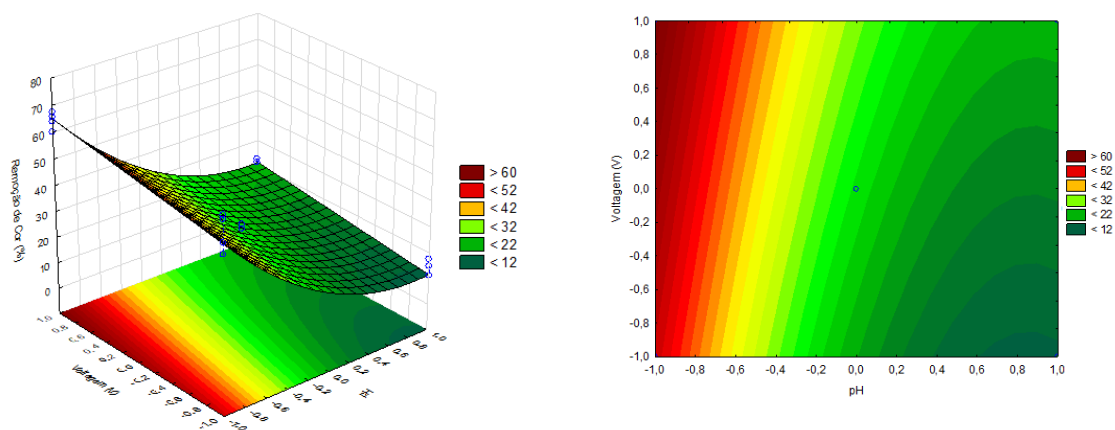
Equação 1

$$\text{Re. DQO} = 21,85 - 12,52x_1 + 2,88x_2 - 4,01x_1x_2 - 5,54x_2x_3 + 3,60x_1x_2x_3$$

Equação 2

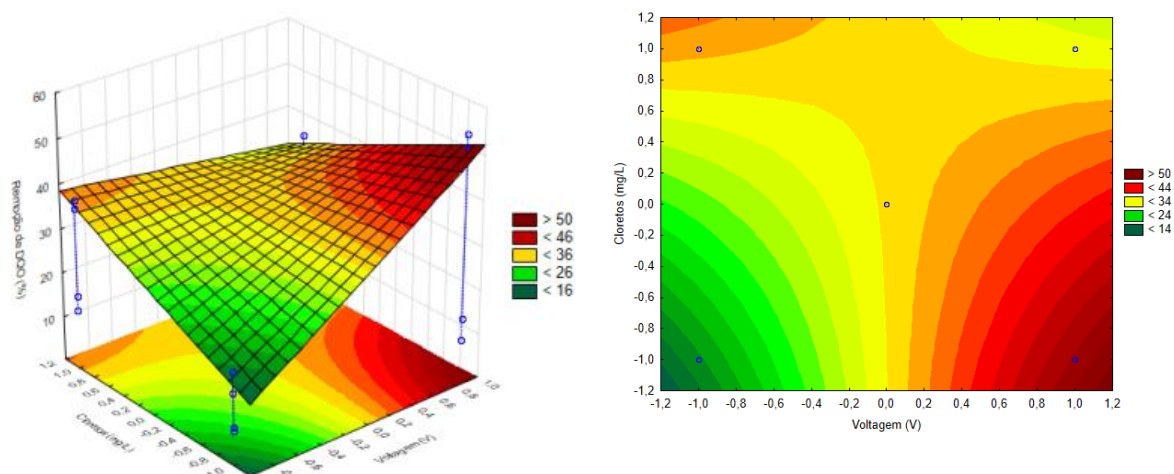
Onde:  $x_1$  é o pH,  $x_2$  a voltagem (V), e  $x_3$  representa os cloretos ( $\text{mg.L}^{-1}$ ). O domínio está codificado, pertencendo ao intervalo  $[-1;1]$ ,  $D(x_1, x_2, x_3) = \{x \in \mathbb{R} / -1 \leq x \leq 1\}$ .

AS figuras 2 e 3 ilustram os gráficos de superfície de resposta e curva de contorno para a remoção de Cor e de DQO, respectivamente.



**Figura 2. Superfície de resposta e curva de contorno da remoção de Cor (%) em função do pH e da voltagem (V). Considerou-se o valor de cloretos ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) no nível (-1) ou  $\text{Cl}^{-1}=500 \text{ mg.L}^{-1}$ .**

A partir da figura 2, observou-se que, com o aumento do pH, o rendimento do processo de eletrofloculação tende a diminuir drasticamente em qualquer voltagem, dentro do intervalo estudado.



**Figura 2. Superfície de resposta da remoção de DQO (%) em função da voltagem (V) e de cloretos (mg.L). Considerou-se o valor de pH no nível (-1) ou pH=5,5.**

No caso da remoção de DQO, ilustrado na figura 3, em pH fixo 5,5, com o aumento da voltagem (9V) a níveis cloretos em 500 mg.L<sup>-1</sup>, o rendimento do processo de eletrofloculação tende a aumentar. Já em condições de cloreto a 2000mg.L<sup>-1</sup> e 9 V, o rendimento tende a diminuir. Com a diminuição da voltagem em concentrações elevadas de cloreto, observou-se melhora no rendimento do processo.

## CONCLUSÕES

Foi possível encontrar, entre as variáveis estudadas, as condições ótimas da eletrofloculação para remoção de cor e demanda química de oxigênio para o lixiviado do aterro sanitário de Caruaru. Foi alcançado valores de remoção de cor de até 67% e de remoção de DQO de até 51%, atingidas na seguinte condição: pH 5,5, voltagem de 9 V e concentração de cloretos em 500 mg.L<sup>-1</sup>. Os diagramas de pareto apontaram que a variável pH tem grande destaque sobre o rendimento do processo, de forma que a diminuição de seu valor influencia positivamente na remoção de cor e DQO do lixiviado pela eletrofloculação. A partir dos dados do planejamento fatorial, foi possível obter modelos para remoção de cor e de DQO significativos estatisticamente.

Para alcançar o padrão de qualidade exigidos pelos órgãos ambientais, é necessária a associação da eletrofloculação com outra técnica. Há necessidade de maiores estudos para afirmar a viabilidade da técnica para o tratamento em grande escala, como o rendimento do processo, consumo energético, consumo de eletrodos e toxicidade do lixiviado após o tratamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. EL-SALAN; M. M.. ABU-ZUID; G. I. Impact of Landfill Leachate on the Groundwater quality: A case study in Egypt. Journal of Advanced Research (2015) 6, 579–586, 2015.
2. ELNENAY, A. M. H. NASSEF, E. MALASH, G. F. MAGID, M. H. A. Treatment of Drilling Fluids Wastewater by Electrocoagulation. Egyptian Journal of Petroleum (2016).
3. FERREIRA, D.S. Estudo comparativo da coagulação/floculação e eletrocoagulação no tratamento de lixiviado de aterro. Rio de Janeiro, 2013. Dissertação de mestrado- Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro 2013.
4. HUDA, N., RAMAN, A.A.A., BELLO, M.M., RAMESH, S. 2017. Electrocoagulation treatment of raw landfill leachate using iron-based electrode: effects of process parameters and optimization. Journal of Environmental Management, 204, 75-81.
5. JOTIN, R., IBRAHIM, S., HALIMOON, N, Electro coagulation for removal of chemical oxygen demand in sanitary landfill leachate, International journal of environmental sciences, v.3, n.2, p. 921-930, set. 2012.



6. LANGE, L.C., ALVES, J.F., AMARAL, M.C.S., MELO JÚNIOR, W.R, Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de Fenton, Eng Sanit Ambient, v.11, n.2, p. 175-183, abr/jun. 2006.
7. LUCENA, L.G., ROCHA, E.M.R., SILVA, F.L.H., CAHINO, A.M, Otimização multivariada do processo foto-Fenton solar na remoção da demanda química de oxigênio em lixiviados de aterros sanitários, Eng Sanit Ambient, v.23, n.3, p.499-507, maio/jun. 2017.
8. MORAVIA, W. G. Avaliação do Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário Através de Processo Oxidativo Avançado Conjugado com Sistema de Separação por Membranas. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2010.
9. OLIVEIRA, Natália M. B. Estatística Experimental. Valinhos: 2017.
10. PANDE, D. SINHA, A. AGRAWAL, S. Impacts of Leachate Percolation on Ground Water Quality: A Case Study of Dhanbad City. Global NEST Journal, Vol 17, No 1, pp 162-174, 2015.
11. WANG, C.T., CHOU, W.L., & KUO, Y.M., 2009, Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/ electroflotation, Journal of hazardous materials, 164, pp 81–86.