



11º SIMPÓSIO
INTERNACIONAL
DE QUALIDADE
AMBIENTAL

02 A 04 DE
OUTUBRO
PORTO ALEGRE-RS
TEATRO DA PUCRS



TEMA
meio ambiente,
política & economia

REMOÇÃO DE ÍONS NITRATO E SULFATO POR ELETROCOAGULAÇÃO-FLOTAÇÃO EM ÁGUA SUBTERRÂNEA

Ezequiel Andrei Somavilla- ezequiel.somavilla@hotmail.com
Universidade Federal de Santa Maria

Gustavo Holz Bracher- gustavohbracher@gmail.com
Universidade Federal de Santa Maria

Cristiane Graepin- crisgraepin@hotmail.com
Universidade Federal de Santa Maria

Andressa Gabriela Glusczak- andressag.g@hotmail.com
Universidade Federal de Santa Maria

Elvis Carissimi- ecarissimi@gmail.com
Universidade Federal de Santa Maria

Resumo: A água subterrânea é muitas vezes a principal alternativa de abastecimento de água para comunidades, principalmente rurais. No entanto, esta pode não ser de qualidade satisfatória para abastecimento público, devido a contaminação por poluição difusa, contaminação de lençóis freáticos. Íons nitrato e sulfato podem prejudicar a qualidade da água quando em excesso, e podem acarretar em inúmeros problemas de saúde pública. Estes têm como principal fonte de contaminação de águas subterrâneas a agricultura com a aplicação de fertilizantes nitrogenados e potássicos, no entanto existem inúmeras fontes, podendo incluir a dissolução natural de minerais. A eletrocoagulação-flotação pode ser uma alternativa para a remoção parcial destes compostos e viabilizar o consumo de água subterrânea. Os íons nitrato são removidos principalmente pois são adsorvidos nas superfícies dos precipitados formados, hidróxidos metálicos. Os íons sulfato possivelmente são removidos por troca iônica, e são de difícil remoção devido à alta estabilidade e solubilidade. Obteve-se resultados de remoção de íons nitrato de até aproximadamente 48%, e 28% para íons sulfato. Modelos matemáticos e superfícies de respostas que representam a operação de eletrocoagulação-flotação foram gerados, com o intuito de flexibilizar a operação.

Palavras-chave: Íons nitrato. Íons sulfato. Eletrocoagulação-flotação.

Realização

 ABES-RS



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375



11º SIMPÓSIO
INTERNACIONAL
DE QUALIDADE
AMBIENTAL

02 A 04 DE
OUTUBRO
PORTO ALEGRE-RS
TEATRO DA PUCRS



TEMA
meio ambiente,
política & economia

REMOVAL OF NITRATE AND SULFATE IONS BY ELETROCOAGULATION-FLOATING IN UNDERGROUND WATER

Abstract: Groundwater is often the main alternative for water supply to communities, mainly rural ones. However, this may not be of satisfactory quality for public supply, due to contamination by diffuse pollution, contamination of groundwater. Nitrate and sulfate ions can impair the quality of water when in excess and can lead to numerous public health problems. These have an as main source of contamination of groundwater to the agriculture with the application of nitrogen and potassium fertilizers, nevertheless exist numerous sources, being able to include the natural dissolution of minerals. The electrocoagulation flotation can be an alternative for the partial removal of these compounds and enable the consumption of groundwater. The nitrate ions are mainly removed as they are adsorbed on the surfaces of the formed precipitates, metal hydroxides. The sulfate ions are possibly removed by ion exchange, and are difficult to remove due to their high stability and solubility. Nitrate removal results of up to approximately 48% and 28% for sulfate ions were obtained. Mathematical models and response surfaces representing the electrocoagulation-flotation operation were generated, with the aim of making the operation more flexible.

Keywords: Nitrate ions. Sulfate ions. Electrocoagulation-flotation.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica em muitas nações é um problema generalizado, a escassez e a poluição fazem com que muitas comunidades não tenham acesso a água com boa qualidade. Os mananciais subterrâneos são fontes de água para abastecimento de muitas comunidades, principalmente rurais. No Brasil, de acordo com dados do IBGE, a água subterrânea é intensamente explorada, 15,6 % dos domicílios utilizam exclusivamente água subterrânea, 77,8 % usam rede de abastecimento (inclui água subterrânea) e 6,6 % usam outras formas (IBGE, 2000). Apesar da crença popular de que água subterrânea é sempre de melhor qualidade, e de que está protegida contra as diversas formas de contaminação, na prática tem-se comprovado o inverso. O mal gerenciamento destas fontes, além de poluição do solo com vazamentos industriais, com esgoto doméstico, a agricultura com os defensivos agrícolas e fertilizantes, e outras fontes podem comprometer a qualidade da água subterrânea.

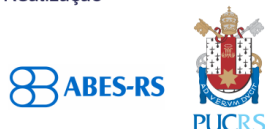
Dentre as principais contaminações de água subterrânea tem-se os íons fluoreto, arsênio, nitrato, nitrito, sulfato, metais pesados como chumbo, zinco, e ferro, por exemplo. A agricultura tem papel importante na contaminação de água subterrânea, uma vez que desempenha papel fundamental na economia de países como o Brasil. Fertilizantes nitrogenados, orgânicos ou inorgânicos, podem reintroduzir espécies de nitrogênio no meio ambiente, e estes podem chegar na forma de nitrito e nitrato na água subterrânea, além de contaminações por deposição atmosférica, esgoto doméstico, lixiviação de áreas agrícolas e lixões (BIGUELINI & GUMY, 2012; LACASA *et al.*, 2011). Já os fertilizantes potássicos, possuem substâncias extremamente solúveis em água, tendo como base sulfatos de potássio, resultando na contaminação da água. Também, a contaminação por estes compostos dá-se pela geologia do local, devido decomposição de solos, dissolução de íons de minerais como gipsita e anidrita (VASCONCELOS & DE OLIVEIRA, 2016).

A falta de acesso a outras fontes de água ou a tratamentos de águas que viabilizem o tratamento de águas contaminadas com sulfato e nitrato, faz com que seja frequente o consumo de água contaminada pela população. Além do abastecimento público, a irrigação, usos industriais e lazer são outros usos, que podem ser afetados pela qualidade. Concentrações superiores a 10 mgL^{-1} de nitrato são tidas como tóxicas para crianças, o consumo pode ser fatal para crianças com idades inferiores a 6 meses, pois induz a metahemoglobina, impedindo o transporte de oxigênio no sangue, e tem-se o potencial formação de nitrosaminas carcinogênicas, além de problemas de intoxicação em animais (BIGUELINI & GUMY, 2012). Quanto ao sulfato, a presença destes em excesso acarretam em gosto amargo ou adstringente à água, provocando rejeição pelos consumidores, além de poder provocar efeitos laxativos, causando diarreia e desidratação (VASCONCELOS & DE OLIVEIRA, 2016).

No tratamento de água, tem-se como alternativa para a remoção destes contaminantes os tratamentos físico-químicos. A eletrocoagulação-flotação (ECF) é uma tecnologia de tratamento que se baseia na aplicação de potencial elétrico nos eletrodos para coagular, flocular e flotar os contaminantes, sem adição de outros reagentes. Esta técnica, faz uso de no mínimo um par de eletrodos, um ânodo e um cátodo. O cátodo, quando submetido à corrente elétrica é oxidado (perde elétrons) e emite íons metálicos, estes realizam a coagulação e floculação, enquanto isso a água é reduzida pela ação do ânodo e forma íons hidrogênio responsáveis pela flotação (BUTLER *et al.*, 2011). De outra forma, a eletrocoagulação gera espécies coagulantes via eletro-dissolução de um ânodo de sacrifício, normalmente é de ferro e alumínio, assim o coagulante é dissolvido em água, hidrolisado para formar espécies monoméricas e poliméricas hidroximetálicas e precipitados, sendo que a quantidade e a especificação dependem do metal, concentração e pH (LACASA *et al.*, 2011).

A ECF tem vantagens significativas perante outras técnicas de tratamento, requer sistema simples, fácil operação, manutenção e automação, menores tempos de retenção, menores quantidades de lodo, reduz a quantidade de reagentes químicos, instalações compactas e altas eficiências (CHEN, 2004; HAKIZIMANA *et al.*, 2017; MOLLAH, 2004). Os fatores que afetam diretamente a eficiência deste processo, são parâmetros relacionados com as condições de operação, tais como, densidade da

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375

corrente aplicada e tempo de reação, e com as características da água, como por exemplo, pH, alcalinidade e condutividade. Em adição, as características do reator também interferem, particularmente, a geometria do reator, a agitação, a superfície e o espaçamento dos eletrodos (HAKIZIMANA et al, 2017).

Neste trabalho, serão determinadas as características operacionais adequadas para a operação unitária de eletrocoagulação-flotação, que serão aplicadas para remover o excesso de íons nitrato e sulfato da água subterrânea. As amostras foram coletadas na Escola Estadual de Ensino Básico Dom Érico Ferrari, de Agudo/RS, em que se tem o real problema com o excesso destes íons e exposição de crianças e adolescentes ao problema.

2. METODOLOGIA

Nesta seção, serão abordadas as principais metodologias, equipamentos, materiais e a área de estudos utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

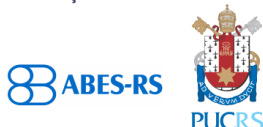
2.1. Área de estudo

A Escola Estadual de Ensino Básico Dom Érico está localizada na zona rural do município de Agudo, Rio Grande do Sul, e possui 167 alunos divididos em três turnos, segundo informações da escola. Esta instituição de ensino é abastecida por água subterrânea, no entanto não há consumo humano devido à qualidade da água, e atualmente o consumo dá-se com água proveniente de outros poços de captação. Assim, esta fonte de água possui usos restringidos, além de possibilitar a exposição de crianças e adolescentes ao risco que é o consumo. Este local, foi utilizado como área de estudo para este projeto, uma vez que possui fontes de captação de água limitadas. O ponto de coleta está exposto na Figura 1, na qual encontra-se a estrutura sob o poço.

Figura 1- Ponto de coleta de água subterrânea na escola.



Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375

2.2. Coleta de amostras

Coletou-se um volume de 80 litros de amostra, coletadas em recipientes de material polimérico, bombonas plásticas de 20 litros, e foram encaminhadas imediatamente ao laboratório para análises, preservação da amostra sob refrigeração, e início dos experimentos de ECF. As análises e os experimentos foram executados no Laboratório de Engenharia de Meio Ambiente (LEMA) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

2.3. Quantificação dos íons

As concentrações de íons foram determinadas através da técnica de cromatografia iônica com 930 Compact IC Flex da Metrohm. O eluente utilizado foi solução de Bicarbonato/Carbonato de Sódio Sigma Aldrich, com supressão de dióxido de carbono (CO₂) por uma solução de Ácido Sulfúrico. O padrão de calibração utilizado foi uma solução mista de 1000 mgL⁻¹ Specsol da Quimlab de íons fluoreto, cloreto, brometo, nitrato, fosfato e sulfato. As curvas de calibração foram ajustadas as faixas de observação dos íons nitrato e sulfato em amostras reais, sendo de 6 pontos no intervalo de 0 à 12 mgL⁻¹ de nitrato e com 10 pontos de 0 à 1000 mgL⁻¹ de sulfato, com coeficiente de determinação (R²) maiores que 0,999 e desvios padrão menores que 3%. Na Figura 2, encontram-se a curva de calibração para os íons nitrato e sulfato, nos intervalos especificados, e na Figura 3, visualiza-se um cromatograma típico para análise aniônica por cromatografia iônica.

Figura 2 – Curvas de calibração utilizadas para quantificação de íons: (a) Íon nitrato; (b) Íon sulfato.

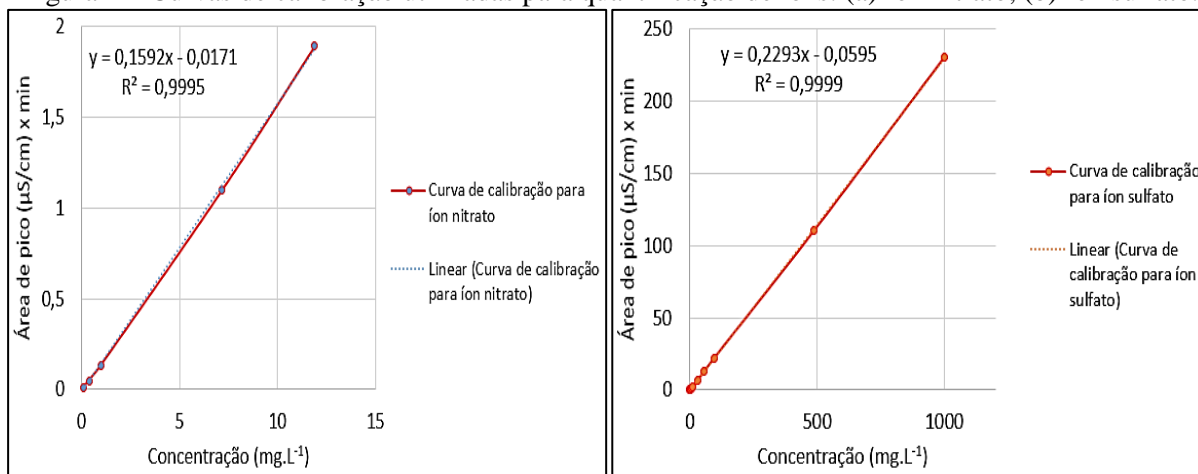
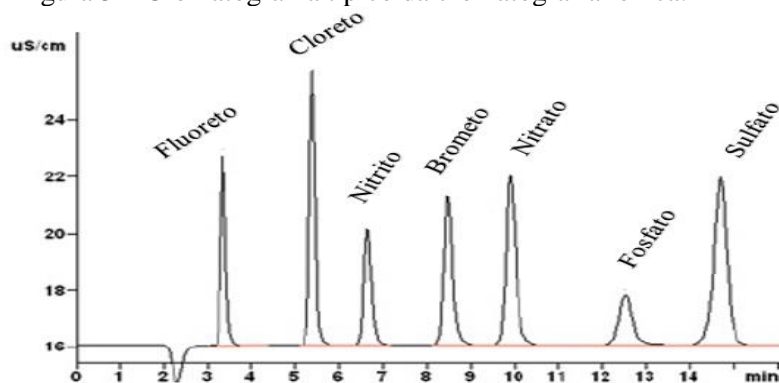
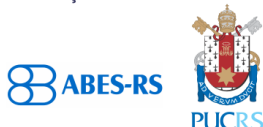


Figura 3 – Cromatograma típico da cromatografia iônica.



Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375

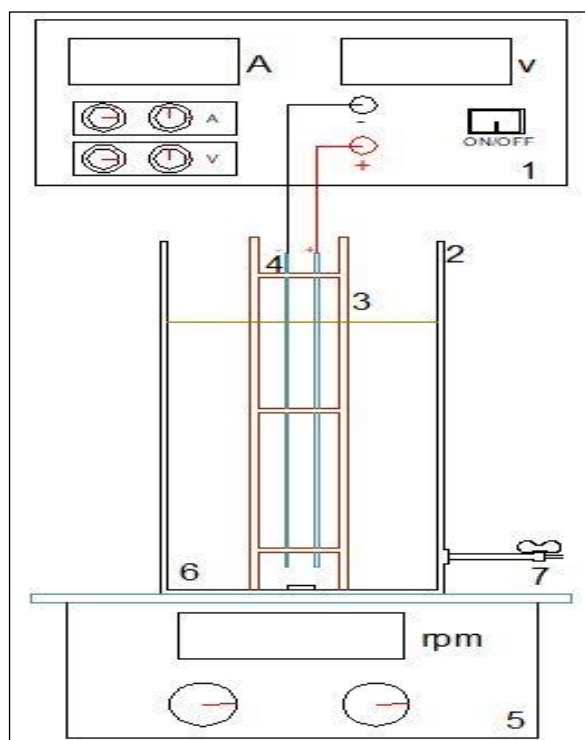


2.4. Reator de ECF

O reator utilizado nos estudos de ECF (Figura 4) foi constituído por um recipiente cilíndrico de polipropileno (PP), equipado com eletrodos de alumínio de pureza 99,0% (15 x 7,5 x 0,05cm) ligados à uma fonte de alimentação de corrente contínua (0 – 30 V, 0 – 2,5 A). O potencial aplicado, através da Lei de Faraday, determina diretamente a dosagem de coagulantes e as taxas de geração de bolhas, e influencia fortemente a mistura de soluções e transferência de massa nos eletrodos (DROUCHE *et al.*, 2012). Foram imersos 7 cm dos eletrodos na amostra a ser tratada, resultando em uma área superficial ativa de 52,5 cm².

O regime de trabalho se caracteriza como sendo descontínuo (batelada), e foram avaliadas oito variáveis independentes: tempo de reação, densidade de corrente, pH, volume, distância de eletrodos, número de eletrodos, agitação e temperatura. As variáveis foram definidas de acordo com outros trabalhos, além de estudos preliminares.

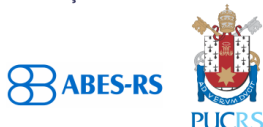
Figura 4- Reator de Eletrocoagulação-flotação. Legenda: 1- Fonte de corrente contínua; 2- Recipiente; 3- Suporte para eletrodos; 4- Eletrodos de alumínio; 5- Agitador magnético; 7- Válvula.



2.5. Planejamento experimental

Para avaliar os efeitos das variáveis anteriormente citadas, foi realizado um planejamento fatorial 2⁸⁻⁴, com 16 ensaios e com triplicata do ponto central, no software StatSoft Statistica 7.0[®]. Para tal, realizou-se os experimentos conforme uma matriz de planejamento combinando as variáveis independentes, tendo duas variáveis dependentes: remoção de nitrato(%) e remoção de sulfato(%). A tabela completa com a matriz de planejamento e os resultados encontra-se no item “Resultados e discussões”.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375



Através da metodologia de planejamento de experimentos é possibilitada a verificação dos efeitos de cada variável na operação unitária de ECF para remoção dos íons, possibilitando economia de tempo e reagentes. Além disso, é gerado um modelo matemático que expressa o comportamento da ECF, superfície de resposta expondo os limites ideais. A análise estatística para comparação de grupos independentes será feita por análise de variância (ANOVA), acompanhada do teste F.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

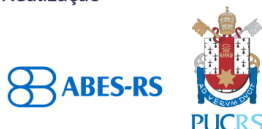
Na Tabela 1, é possível verificar os valores codificados e reais correspondentes, referentes ao Planejamento Fatorial, com as variáveis dependentes e independentes. Como base para os ensaios, a concentração inicial de íon sulfato foi de 314,32 mgL⁻¹ e de nitrato de 12,54 mgL⁻¹ (N-NO₃).

Tabela 1- Matriz de Planejamento Fatorial com os valores codificados (C) e reais (R) das variáveis independentes e com os resultados das variáveis dependentes.

pH		Distância de eletrodos (cm)		Temperatura (°C)		Número de placas		Agitação (rpm)		Tempo de reação (min)		Volume a ser tratado (L)		Densidade de corrente (A/cm ²)		Remoção de nitrato (%)	Remoção de sulfato (%)
R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C	R	C		
4,0	-1	0,5	-1	15,0	-1	2	-1	100	-1	5,0	-1	1,5	-1	0,0010	-1	28,21	18,83
10,0	1	0,5	-1	15,0	-1	2	-1	300	1	30,0	1	4,0	1	0,0010	-1	31,05	18,54
4,0	-1	1,5	1	15,0	-1	2	-1	300	1	30,0	1	1,5	-1	0,0476	1	31,87	27,87
10,0	1	1,5	1	15,0	-1	2	-1	100	-1	5,0	-1	4,0	1	0,0476	1	36,35	17,83
4,0	-1	0,5	-1	35,0	1	2	-1	300	1	5,0	-1	4,0	1	0,0476	1	44,32	18,91
10,0	1	0,5	-1	35,0	1	2	-1	100	-1	30,0	1	1,5	-1	0,0476	1	28,04	27,73
4,0	-1	1,5	1	35,0	1	2	-1	100	-1	30,0	1	4,0	1	0,0010	-1	40,29	17,25
10,0	1	1,5	1	35,0	1	2	-1	300	1	5,0	-1	1,5	-1	0,0010	-1	32,03	15,78
4,0	-1	0,5	-1	15,0	-1	4	1	100	-1	30,0	1	4,0	1	0,0476	1	30,53	24,32
10,0	1	0,5	-1	15,0	-1	4	1	300	1	5,0	-1	1,5	-1	0,0476	1	47,99	17,04
4,0	-1	1,5	1	15,0	-1	4	1	300	1	5,0	-1	4,0	1	0,0010	-1	43,92	17,38
10,0	1	1,5	1	15,0	-1	4	1	100	-1	30,0	1	1,5	-1	0,0010	-1	41,76	17,30
4,0	-1	0,5	-1	35,0	1	4	1	300	1	30,0	1	1,5	-1	0,0010	-1	45,34	16,71
10,0	1	0,5	-1	35,0	1	4	1	100	-1	5,0	-1	4,0	1	0,0010	-1	37,53	15,77
4,0	-1	1,5	1	35,0	1	4	1	100	-1	5,0	-1	1,5	-1	0,0476	1	31,95	19,33
10,0	1	1,5	1	35,0	1	4	1	300	1	30,0	1	4,0	1	0,0476	1	45,22	16,89
7,0	0	1,0	0	25,0	0	3	0	200	0	17,5	0	2,8	0	0,0243	0	38,75	16,84
7,0	0	1,0	0	25,0	0	3	0	200	0	17,5	0	2,8	0	0,0243	0	37,69	15,40
7,0	0	1,0	0	25,0	0	3	0	200	0	17,5	0	2,8	0	0,0243	0	34,19	15,32

As variáveis independentes foram elencadas neste trabalho devido a não ser encontrado nenhum trabalho que avaliasse a relação destas na remoção de íons nitrato e sulfato em amostras reais. O pH tem forte influência na especiação do alumínio (agente coagulante); o número de eletrodos e a distância entre os eletrodos implica no aumento ou diminuição da geração de espécies alumínio pelo potencial elétrico que se modifica; a temperatura pode influenciar na catálise de reações, assim como influenciar na termodinâmica da operação; a agitação influencia no contato dos precipitados com os ânions a se remover; o tempo de reação e densidade de corrente são os responsáveis pela intensidade da dosagem do coagulante; e o volume a ser tratado com alguma possibilidade de superdimensionamento,

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375



ou seja, se a geração de espécies de alumínio não estaria saturando a solução. No Tabela 2, estão expostas as estatísticas descritivas relacionadas as variáveis remoção de nitrato e de sulfato.

Tabela 2- Estatísticas descritivas para os dados de remoção de nitrato e sulfato.

	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Variância	Desvio padrão
Remoção de nitrato (%)	37,21	37,53	28,04	47,99	39,74	6,30
Remoção de Sulfato (%)	18,69	17,30	15,32	27,87	14,29	3,78

Através das análises descritivas, obteve-se valores mínimos de 28,04% de remoção de nitrato e 15,32 % de sulfato, e máximos de 47,99% para nitrato e 27,87% para sulfato. Considerando as concentrações iniciais, e o padrão de potabilidade imposto pela PRC n° 5 de 28 de setembro de 2017, anexo XX, de 10 mgL⁻¹ para nitrato (N-NO₃) e de 250 mgL⁻¹ para sulfato (SO₄⁻²), implicando em eficiências mínimas de 20,25% e 20,46%, respectivamente. Deste modo, verifica-se que todas as combinações resultaram em eficiências que atendem o padrão para nitrato, e apenas 3 combinações para remoção de sulfato.

As baixas eficiências para remoção de sulfato também foram evidenciadas por Mamelkina *et al.* (2017), justificadas pela alta solubilidade e estabilidade em soluções aquosas dos ânions sulfato. Kumar e Goel (2010) obtiveram 84% de remoção de íons nitrato em seu trabalho, no entanto, para obter essa eficiência, o tempo de reação utilizado foi de 3 horas e de 6 horas, o que pode justificar a baixa eficiência na remoção neste trabalho. Ricordel *et al.* (2010) obtiveram eficiência de remoção similar a encontrada neste trabalho, obtiveram 26% de remoção de uma amostra com concentração inicial de 13,50 mgL⁻¹ de nitrato. Jo *et al.* (2016) também avaliaram a remoção de íons nitrato e sulfato com eletrodos de alumínio, obtendo eficiências de até 60,6% de remoção de nitrato e 50,0% para sulfato.

Para verificar o efeito das variáveis em relação a remoção de íons nitrato e sulfato, manteve-se intervalo de confiança de 90%, com 10% de probabilidade de rejeição da hipótese nula. Deste modo, na Tabela 1 tem-se os resultados dos efeitos significativos, além do p-valor de cada variável independente.

Tabela 3- Resumo da análise de efeitos para remoção de nitrato e sulfato.

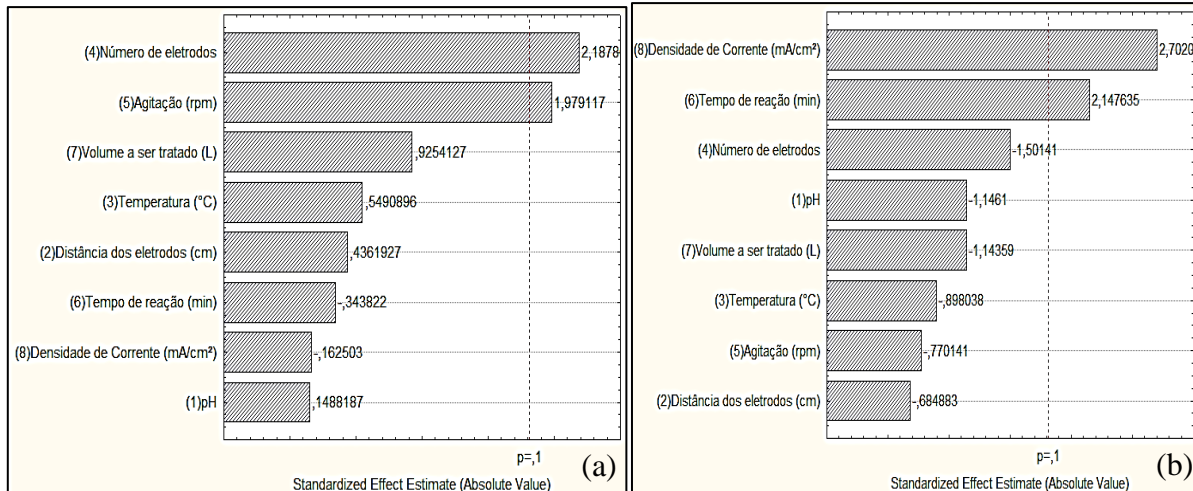
		Remoção de nitrato (%)			Remoção de sulfato (%)		
		Efeito	p-valor	Efeito com $\alpha=0,10$	Efeito	p-valor	Efeito com $\alpha=0,10$
	Média	37,211	0,000		18,687	0,000	
X ₁	pH	0,443	0,885		-1,717	0,278	
X ₂	Distância de eletrodos (cm)	1,297	0,672		-1,026	0,509	
X ₃	Temperatura (°C)	1,633	0,595		-1,345	0,390	
X ₄	Número de eletrodos	6,507	0,054	X	-2,249	0,164	
X ₅	Agitação (rpm)	5,886	0,076	X	-1,154	0,459	
X ₆	Tempo de reação (min)	-1,023	0,738		3,217	0,057	X
X ₇	Volume a ser tratado (L)	2,752	0,377		-1,713	0,279	
X ₈	Densidade de corrente (mA/cm ²)	-0,483	0,874		4,048	0,022	X

Através da análise de efeitos, pode-se concluir que o número de eletrodos e a agitação são as variáveis que influenciam na remoção nitrato, e as variáveis tempo de reação e densidade de corrente para a remoção de íons sulfato. Ressalta-se que todos os efeitos significativos foram positivos, indicando que o aumento destas variáveis aumentam a eficiência de remoção de cada íon. Uma representação da grandeza dos efeitos de cada variável pode ser verificado nos Diagramas de Pareto, este representa o valor absoluto do efeito padronizado estimado para cada variável, conforme pode se visualizar na Figura



5. A ordem em que as variáveis estão dispostas indicam a ordem de importância de cada uma em relação a operação unitária de ECF, sendo que observa-se efeitos diferentes na remoção de sulfato e de nitrato devido aos mecanismos de remoção envolvidos.

Figura 5- Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para remoção de íons nitrato (a) e sulfato (b).

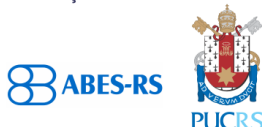


Para os íons nitrato, o pH resultou na menor significância para o processo, mesmo o pH influenciando na especiação do alumínio e na quantidade deste na solução, o que nos remete ao fato de que a remoção de íons nitrato não está relacionada com as espécies de alumínio. De acordo com Lacasa et al. (2011), a remoção de ânions nitrato dá-se principalmente através da adsorção nas superfícies dos precipitados de hidróxido de alumínio $[Al(OH)_3(s)]$ gerados e quando estes estão crescendo na ECF, confirmados devido a potencial zeta tornar-se negativo ao longo do tratamento. O mesmo autor afirma que independente do coagulante metálico gerado, seja a base de ferro ou alumínio, a eficiência será a mesma, e isso também justifica o fato da densidade de corrente não ser uma variável significativa, pois essa atua só na dosagem do coagulante. Em resumo, a eficiência da ECF é devido ao aumento da competição entre ânions por adsorção sobre precipitados de hidróxido de metal em crescimento e pela diminuição das larguras das camadas duplas de partículas precipitadas. Com isso, pode-se relacionar a agitação, pois quanto maior a agitação, maior o contato entre os íons nitrato e os hidróxidos metálicos, e o número de placas, que promovem maior turbilhonamento, além de ampliar a formação de precipitados

Mamelkina *et al.* (2017) realizaram estudos com eletrocoagulação-flotação com eletrodos de ferro para a remoção de íons sulfato. Os autores elencaram que a dosagem de coagulante e o pH como significativos para a efetiva operação. Nos resultados deste trabalho, embora que com nível de significância de 90% não tenha sido elencado como significante, o pH ficou entre as 4 variáveis mais importantes para o processo. Os autores elencam como principal mecanismo de ECF a troca iônica, e elencam que uma das vantagens é a não geração de concentrações residuais de cloreto, como acontece na coagulação tradicional. Modelos matemáticos podem representar o comportamento da ECF, e podem ser gerados levando em consideração os resultados dos efeitos significativos expostos anteriormente. Nas equações 1 e 2 estão expressos os coeficientes de regressão para a remoção de íons nitrato e sulfato, respectivamente. Ressalta-se que o modelo matemático é gerado em função dos valores codificados, sendo que a aplicação de qualquer combinação utilizada, desde que dentro dos intervalos estudados neste trabalho possibilitam obter qual seria a eficiência que obter-se na prática.

$$\text{Remoção de nitrato (\%)} = 37,21 + 3,25X_4 + 2,94X_5 \quad (1)$$

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375



$$\text{Remoção de sulfato (\%)} = 18,69 + 1,61X_6 + 2,02X_8 \quad (2)$$

A análise de variância (ANOVA) possibilita verificar a confiabilidade dos modelos matemáticos gerados, assim como a possibilidade de geração de superfícies de respostas. Para a remoção destes íons, com nível de significância de 90% os modelos possuem confiabilidade aceitável, ou seja, são representativos para a operação de ECF. Assim, podem ser geradas as superfícies de resposta relacionando as variáveis significativas, conforme Figura 6 e Figura 7.

Figura 6- Superfície de resposta para remoção de íons nitrato por ECF.

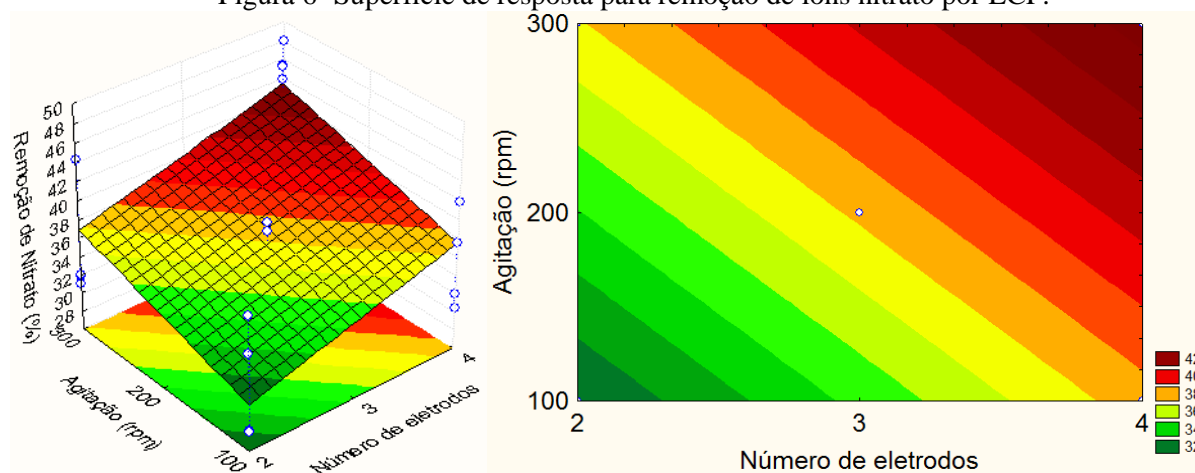
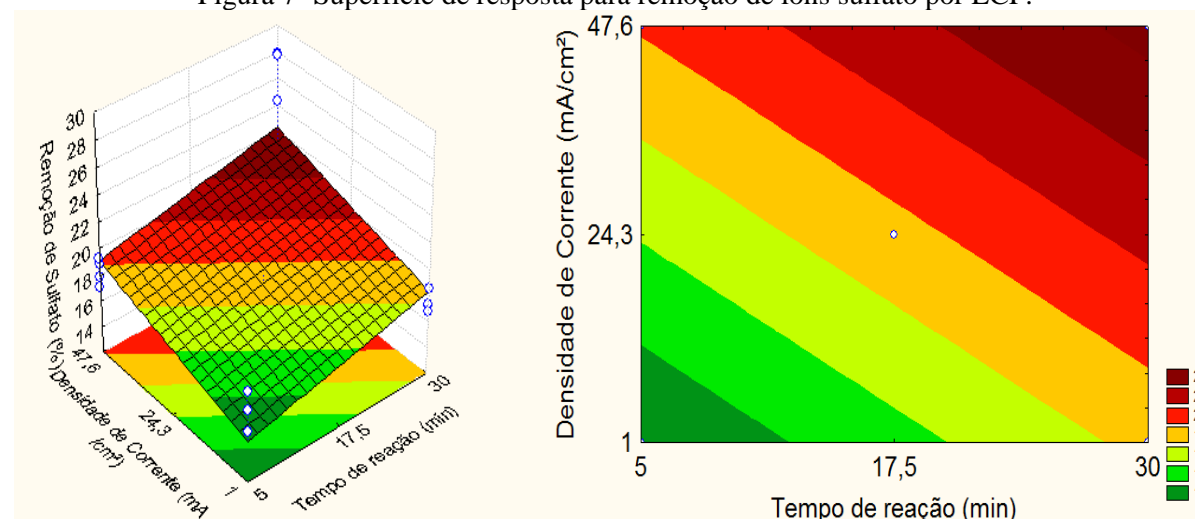


Figura 7- Superfície de resposta para remoção de íons sulfato por ECF.



Através das superfícies de resposta, pode-se verificar as condições ótimas, sendo que em ambas as superfícies tem-se uma relação de inversa proporcionalidade, ou seja, quando uma variável aumenta tem-se a possibilidade da outra variável diminuir. Para a remoção de íons sulfato, em que a densidade de corrente e o tempo de reação foram significativos, tem-se que a geração de coagulantes é proporcional ao tempo de eletrólise e à densidade de corrente, empregados no processo, o que pode justificar em partes a remoção (BUKHARI, 2008).

Dentre as alternativas eletroquímicas para redução de íons nitrato, Pulkka *et al.* (2014) define a eletrorredução como a melhor alternativa para remoção das espécies de nitrogênio, devido a



11º SIMPÓSIO
INTERNACIONAL
DE QUALIDADE
AMBIENTAL

02 A 04 DE
OUTUBRO
PORTO ALEGRE-RS
TEATRO DA PUCRS



TEMA
meio ambiente,
política & economia

oxidação dos compostos de nitrito e amônia a nitrato e por fim a nitrogênio gasoso. Suzuki *et al.* (2012) estudaram o processo de remoção de nitrato, eles observaram que o nitrato foi reduzido pelo mecanismo de redução direta mais provável do que pela redução indireta.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de ECF demonstrou-se de eficiência satisfatória para remoção de íons nitrato e sulfato da água subterrânea para um curto tempo de tratamento, sob baixas densidades de corrente. Deste modo, a obtenção de eficiências aceitáveis de remoção em testes de bancada, enfatiza o alto potencial desta técnica, além de que são removidos outros íons durante a operação, restando a necessidade de estudos em escala piloto e fluxo contínuo.

Neste estudo, obteve-se eficiência máxima de aproximadamente 48% de remoção de íons nitrato e de 28% para íons sulfato, atendendo o padrão de potabilidade. Além disso, a geração de superfícies de resposta e um modelo matemático que descreve bem o processo de ECF considerando as principais variáveis, densidade de corrente e tempo de reação, flexibiliza a aplicação da técnica em estações de tratamento. O número de eletrodos e a agitação foram as variáveis que influenciaram na remoção de nitrato, e a densidade de corrente e o tempo de reação para remoção de sulfato.

Por fim, em comparação com técnicas convencionais de íons sulfato e nitrato, a ECF consegue uma remoção mais rápida, conforme eficiências demonstradas neste trabalho. No entanto, a realização dos custos da operação, e a geração de alumínio residual podem ser explorados em trabalhos futuros, além da otimização da remoção.

4. REFERÊNCIAS E CITAÇÕES

BIGUELINI, C. P.; GUMY, M. P. Saúde ambiental: subterrâneas de poços profundos na região sudoeste do Paraná. **Revista Faz Ciência**, v. 14, p. 153–175, 2012.

BUTLER, E. et al. Electrocoagulation in Wastewater Treatment. **Water**, v. 3, n. 4, p. 495–525, 2011.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11–41, jul. 2004.

HAKIZIMANA, J. N. et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. **Desalination**, v. 404, p. 1–21, fev. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. n. 85-240-881–4, p. 397, 2000.

JO, E. et al. A study on the removal of sulfate and nitrate from the wet scrubber wastewater using electrocoagulation. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 17, p. 7833–7840, 8 abr. 2016.

KUMAR, N. S.; GOEL, S. Factors influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 173, n. 1–3, p. 528–533, 15 jan. 2010.

LACASA, E. et al. Removal of nitrates from groundwater by electrocoagulation. **Chemical Engineering Journal**, v. 171, n. 3, p. 1012–1017, jul. 2011.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375



11º SIMPÓSIO
INTERNACIONAL
DE QUALIDADE
AMBIENTAL

02 A 04 DE
OUTUBRO
PORTO ALEGRE-RS
TEATRO DA PUCRS



TEMA
meio ambiente,
política & economia

MAMELKINA, M. A. et al. Removal of sulfate from mining waters by electrocoagulation. **Separation and Purification Technology**, v. 182, p. 87–93, jul. 2017.

MOLLAH, M. Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 109, n. 1–3, p. 165–171, jun. 2004.

PULKKA, S. et al. Electrochemical methods for the removal of anionic contaminants from water – A review. **Separation and Purification Technology**, v. 132, p. 252–271, ago. 2014.

RICORDEL, C.; DARCHEN, A.; HADJIEV, D. Electrocoagulation–electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. **Separation and Purification Technology**, v. 74, n. 3, p. 342–347, set. 2010.

SUZUKI, T. et al. Mechanism of nitrate reduction by zero-valent iron: Equilibrium and kinetics studies. **Chemical Engineering Journal**, v. 183, p. 271–277, fev. 2012.

VASCONCELOS, M. A.; DE OLIVEIRA, I. B. Caracterização preliminar da qualidade da água subterrânea no estado da Bahia quanto aos teores de sulfato. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de águas subterrâneas**, n. 71, p. 1–12, 2016.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br
abes-rs@abes-rs.org.br
(51) 3212.1375