

Recuperação de fósforo de efluente industrial empregando fontes de magnésio

Phosphorus recovery from industrial effluent using magnesium sources

RESUMO

Este presente trabalho teve como objetivo a definição e caracterização do efluente de estudo e a realização de testes de bancada para avaliar a recuperação de fósforo utilizando os reagentes cloreto de magnésio ($MgCl_2$) e óxido de magnésio (MgO) como fontes alternativas de magnésio. Os testes de recuperação de fósforo foram divididos em três etapas, sendo elas Etapa preliminar, Etapa 2 e Etapa 3, que consistiram na observação do comportamento da adição das fontes de magnésio ao efluente e no controle de variáveis como o pH das amostras e a massa de reagente de magnésio a ser dosada. A Etapa 3 forneceu resultados que apontaram para uma remoção de fósforo superior a 80% nas alíquotas geradas nesta etapa. Obteve-se como conclusão que, as condições de pH entre 8,5 e 9,5 mediante dosagem de 1,5g de reagente de magnésio, propiciaram maior remoção do nutriente, especialmente para o reagente cloreto de magnésio, que apresentou maior eficiência.

PALAVRAS-CHAVE: Águas Residuais. Fósforo. Recuperação.

ABSTRACT

This work aimed to define and characterize the study wastewater and to presentate the results obtained from phosphorus recovery tests using magnesium chloride ($MgCl_2$) and magnesium oxide (MgO) as alternative magnesium sources. The phosphorus recovery tests were divided into three stages, being them Preliminar stage, Stage 2 and Stage 3, that consisted on the observation of the effect of magnesium sources addition at wastewater and on the control of variables such as pH of the samples and the mass of the magnesium reagent to be dosed. Stage 3 provided results that pointed to a phosphorus removal greater than 80% in the aliquots generated in this stage. It was concluded that pH conditions between 8.5 and 9.5 upon addition of 1.5 g of magnesium reagent, provided greater removal of the nutrient, especially for the magnesium chloride reagent, which showed greater efficiency.

KEYWORDS: Sewage. Phosphorus. Recovery.

Julia Pereira Barbosa Alves

julia_pba12@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli

jpietrobelli@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Denilton da Conceição Fritz Junior

deniltonfritzjr@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O fenômeno da industrialização, iniciado no século XVIII, acarretou e segue trazendo, progressivamente, consequências que incidem de forma direta no meio ambiente. Um dos maiores efeitos desencadeados pelo avanço deste processo é a geração de efluentes industriais (BAKARE; SHABANGU; CHETTY, 2017). Os efluentes industriais podem ser dotados de elevada carga de contaminantes que podem causar danos à fauna e à flora (SOUSA, 2015), além do mais, geralmente contém nutrientes como nitrogênio amoniacal total e fósforo (CASTRO, 2014), necessitando assim de tratamentos físicos, químicos e biológicos para que possam ser dispostos no meio ambiente.

O fósforo, um dos nutrientes mais comuns encontrados nos efluentes líquidos, é extraído da rocha fosfática e é uma fonte essencial para o desenvolvimento de plantas, animais e humanos (PRADEL; AISSANI, 2019). É considerado um elemento essencial para o crescimento e fornecimento de energia para os processos genéticos humanos (WU et al., 2019), nos bioprocessos das plantas, na produção de comida em escala global e na produção de fertilizantes (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). Embora seja indispensável para as funções vitais dos seres vivos, o fósforo é um recurso limitado, não renovável, que não pode ser substituído por outro elemento em fertilizantes (PRADEL; AISSANI, 2019) e que pode se tornar escasso futuramente devido ao aumento da demanda para fins industriais e agrícolas (HECKENMÜLLER; NARITA; KLEPPER, 2014).

Levando em conta a problemática envolvendo a escassez do fósforo em um cenário futuro e os impactos causados pelo fósforo no meio ambiente através do fenômeno da eutrofização, o método de recuperação de fósforo na forma de estruvita se apresenta como uma técnica promissora (LI et al., 2018), dentre os métodos físicos, químicos e biológicos de tratamento de efluentes, para atenuar ambas questões simultaneamente. No que se refere aos processos de tratamento de efluentes, conforme Santos (2011), os processos físicos tendem a ser mais custosos e eventualmente pouco eficientes na recuperação do fósforo, enquanto que processos biológicos estão passíveis de alta variação de eficiência na remoção em virtude de dificuldades operacionais, ao passo que o tratamento químico se apresenta como um método seguro e bem estabelecido (como no caso da precipitação química da estruvita).

A estruvita, ou fosfato de amônio e magnésio hexahidratado ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), é um mineral denso, inodoro e de coloração branca. É altamente solúvel em soluções ácidas, porém, tem baixa solubilidade em água e é insolúvel em soluções alcalinas. Para promover a recuperação de fósforo através da precipitação da estruvita, compostos de magnésio são usados para induzir a formação do mineral (SANTOS, 2011). Embora o método de recuperação de fósforo com adição de magnésio tenha seu reconhecimento como uma saída eficiente para contornar problemas operacionais e para conservar fontes naturais, o uso de fontes de magnésio puras pode prejudicar a sustentabilidade e a viabilidade econômica do processo, uma vez que o preço de produção da estruvita depende fortemente do custo da fonte de magnésio (SHADDEL et al., 2020). Assim, a partir da demanda de diminuição de custo, surge a motivação para a adoção de fontes de alternativas de magnésio para propiciar a recuperação do fósforo através da estruvita.

Dessa forma, a proposta deste presente trabalho é avaliar a recuperação de fósforo em um efluente industrial do setor de bebidas empregando os reagentes cloreto de magnésio ($MgCl_2$) e óxido de magnésio (MgO) como fontes alternativas de magnésio em comparação com fontes convencionais de magnésio, valendo-se do método de precipitação desse nutriente na forma de estruvita.

MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir a proposta do estudo foram definidas e apresentadas as características físico-químicas do efluente de interesse, definida a metodologia de trabalho, realizadas amostragens e testes de recuperação de fósforo em escala de banca e avaliada a recuperação de fósforo nas amostras geradas a partir dos testes.

O efluente de interesse para este estudo provém de uma indústria cervejeira da região dos Campos Gerais e se trata de um efluente obtido após a decantação secundária, de modo que este já tenha passado por tratamentos físico-químicos e biológicos prévios. Sendo assim, o sobrenadante líquido pós-decantador secundário (efluente de interesse), possui alguns parâmetros adequados em faixa de controle para disposição final. Todavia, se faz necessário um tratamento terciário para remoção do excesso de fósforo e, é nesta perspectiva, que a precipitação da estruvita é avaliada como uma alternativa para tratamentos terciários convencionais para remoção deste nutriente, tais como tratamentos de precipitação química utilizando sais de ferro e de alumínio como coagulantes, processos biológicos, troca iônica ou adsorção (GUALBERTO, 2009). O efluente de estudo foi coletado na saída do decantador secundário, acondicionado em frascos plásticos de aproximadamente 1L e mantido in natura e sob refrigeração até o momento dos testes em bancada.

A metodologia de testes de bancada em efluente dividiu-se basicamente em três etapas, sendo a primeira uma etapa preliminar de teste, cujo objetivo era observar o comportamento dos reagentes de magnésio mediante sua adição ao efluente em relação ao efeito do pH no meio (aumento ou diminuição), coagulação e decantação do efluente. As duas seguintes etapas, por sua vez, tiveram uma abordagem baseada no ajuste e controle do pH do efluente e no ajuste de massa de reagente de magnésio adicionada ao efluente de estudo. Assim, foram geradas alíquotas das amostras ao final de cada teste e a estas foram adicionadas H_2SO_4 como agente preservante, conforme metodologia descrita no Standard Methods (APHA; AWWA; WEF, 2017).

Para a Etapa 2, os testes foram realizados em uma extensa faixa de pH, compreendida de pH 5,0 a 11,0, variando sempre a cada 1,0 unidade de pH, dosando uma determinada massa de reagente de magnésio em um volume fixo de efluente. As análises de fósforo total para as alíquotas da Etapa 2 foram realizadas seguindo a metodologia colorimétrica com ácido ascórbico para determinação da quantidade de fósforo nas alíquotas, descrito em Standard Methods (APHA; AWWA; WEF, 2017). Para a Etapa 3, buscou-se refinar a metodologia, de modo a estabelecer uma faixa de pH de trabalho menor, variando de pH 8,5 a 10,5 com intervalo de 1,0 unidade de pH, testando menor quantidade em massa de reagente de magnésio em um volume superior, controlando com mais rigor variáveis como temperatura inicial do efluente de estudo e tempo de agitação, com intuito de obter melhores resultados e gerar maior volume de alíquotas para análise ao final

dos testes. O esquema de testes para as Etapas 2 e 3 está apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Metodologia adotada para as Etapas 2 e 3

Etapa	Teste	Faixa de pH testada	Massa de reagente dosado (g)	Alíquotas geradas	Volume de efluente usado (mL)
Etapa 2	RF-1	5,0 – 9,0	2,0	AL-1 a AL-30	200
Etapa 2	RF-2	8,0 – 11,0	5,0	AL-31 a AL-54	200
Etapa 3	RF-3	8,5 – 10,5	1,5	AL-55 a AL-66	400
Etapa 3	RF-4	8,5 – 10,5	0,5	AL-68 – AL-79	400

Fonte: Autoria própria (2020)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentados na Tabela 2 representam os principais parâmetros físico-químicos do efluente de estudo, sendo eles baseados tanto no projeto do decantador quanto nas amostragens do efluente que indicam a realidade do processo. Vale ressaltar que, embora esses valores sejam considerados como referência, tais parâmetros são passíveis de sofrer variações conforme as condições do processo.

Tabela 2 - Caracterização físico-química do efluente de estudo.

Parâmetro	Unidade	Valor
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	mg/L	15 – 50
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	50 – 150
Sólidos Suspensos	mg/L	70
pH		7,3 – 7,8
Temperatura	°C	35 – 39
Fósforo Total	mg/L	10 – 18

Fonte: Autoria própria (2020)

Para as Etapas 2 e 3, designou-se o código AL para identificar as amostras e suas respectivas alíquotas coletadas (sobrenadante líquido) ao final de cada teste de recuperação de fósforo, cuja sigla de designação foi definida como RF.

Para a Etapa 2, os resultados obtidos tiveram caráter qualitativo em relação ao valor de referência de 1,0 mg/L adotado para a análise das alíquotas, uma vez que a legislação nacional não estabelece limites máximos de emissão de fósforo e, com respaldo do estudo de Chao e Morita (2006), o valor estipulado como referência é o mesmo previsto por lei em localidades como estado de Santa Catarina, alguns estados dos Estados Unidos e na Suécia.

Das alíquotas coletadas na Etapa 2, somente as alíquotas entre AL-39 e AL-54 apresentaram resultados condizentes com o critério estabelecido em relação ao

teor de fósforo (Conc. De Fósforo). A Tabela 3 apresenta o resultado da análise para esta etapa.

Tabela 3 - Resultados de análise de fósforo das alíquotas da Etapa 2

Código	Coagulante	pH de teste	Conc. de Fósforo (mg/L)	Código	Coagulante	pH de teste	Conc. de Fósforo (mg/L)
AL-39	MgCl ₂	8,0	< 1,0	AL-47	MgO	8,0	< 1,0
AL-40	MgCl ₂	9,0	< 1,0	AL-48	MgO	9,0	< 1,0
AL-41	MgCl ₂	10,0	< 1,0	AL-49	MgO	10,0	< 1,0
AL-42	MgCl ₂	11,0	< 1,0	AL-50	MgO	11,0	< 1,0
AL-43	MgCl ₂	8,0	< 1,0	AL-51	MgO	8,0	< 1,0
AL-44	MgCl ₂	9,0	< 1,0	AL-52	MgO	9,0	< 1,0
AL-45	MgCl ₂	10,0	< 1,0	AL-53	MgO	10,0	< 1,0
AL-46	MgCl ₂	11,0	< 1,0	AL-54	MgO	11,0	< 1,0

Fonte: A autoria própria (2020)

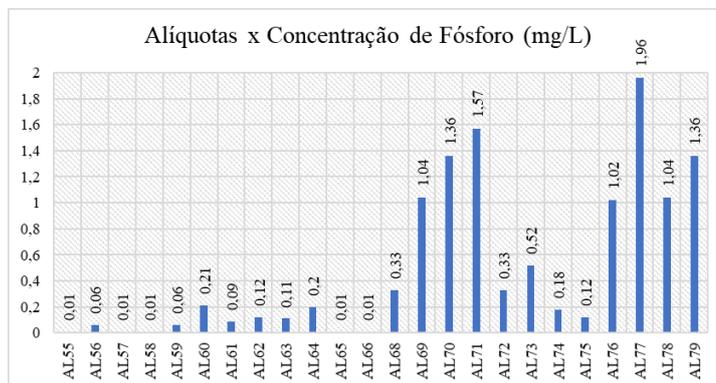
Para a Etapa 3, as análises de fósforo total nas alíquotas coletadas nesta etapa foram realizadas seguindo o mesmo método apresentado na discussão da Etapa 2. Os resultados das análises forneceram a concentração de fósforo (em mg/L) presente nas alíquotas, para cada um dos coagulantes (Coag.), conforme apresentam a Tabela 4 e o Gráfico 1, respectivamente.

Tabela 4 - Resultados da análise de fósforo nas alíquotas da Etapa 3

Código	Coag.	pH de teste	Conc. Fósforo (mg/L)	Código	Coag.	pH de teste	Conc. Fósforo (mg/L)
AL-55	MgO	8,5	0,01	AL-68	MgCl ₂	8,5	0,33
AL-56	MgO	9,5	0,06	AL-69	MgCl ₂	8,5	1,04
AL-57	MgO	8,5	0,01	AL-70	MgCl ₂	9,5	1,36
AL-58	MgO	9,5	0,01	AL-71	MgCl ₂	9,5	1,57
AL-59	MgO	10,5	0,06	AL-72	MgCl ₂	10,5	0,33
AL-60	MgO	10,5	0,21	AL-73	MgCl ₂	10,5	0,52
AL-61	MgCl ₂	8,5	0,09	AL-74	MgO	8,5	0,18
AL-62	MgCl ₂	8,5	0,12	AL-75	MgO	8,5	0,12
AL-63	MgCl ₂	9,5	0,11	AL-76	MgO	9,5	1,02
AL-64	MgCl ₂	9,5	0,2	AL-77	MgO	9,5	1,96
AL-65	MgCl ₂	10,5	0,01	AL-78	MgO	10,5	1,04
AL-66	MgCl ₂	10,5	0,01	AL-79	MgO	10,5	1,36

Fonte: A autoria própria (2020)

Gráfico 1 - Concentrações de fósforo (mg/L) nas alíquotas da Etapa 3



Fonte: Autoria própria (2020)

Tomando como referência o valor mínimo de teor de fósforo presente no efluente in natura pós-decantador (vide subseção “Caracterização do efluente de estudo”), calcula-se que todas as alíquotas da Etapa 3 apresentaram remoção mínima de fósforo de 80% em relação ao valor de referência de 10 mg P/L. Os percentuais de remoção são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Remoção de Fósforo nas alíquotas da Etapa 3

Código	Coag.	Conc. final Fósforo (mg/L)	Remoção de Fósforo (%)	Código	Coag.	Conc. final Fósforo (mg/L)	Remoção de Fósforo (%)
AL-55	MgO	0,01	99,9	AL-68	MgCl ₂	0,33	96,7
AL-56	MgO	0,06	99,4	AL-69	MgCl ₂	1,04	89,6
AL-57	MgO	0,01	99,9	AL-70	MgCl ₂	1,36	86,4
AL-58	MgO	0,01	99,9	AL-71	MgCl ₂	1,57	84,3
AL-59	MgO	0,06	99,4	AL-72	MgCl ₂	0,33	96,7
AL-60	MgO	0,21	97,9	AL-73	MgCl ₂	0,52	94,8
AL-61	MgCl ₂	0,09	99,1	AL-74	MgO	0,18	98,2
AL-62	MgCl ₂	0,12	98,8	AL-75	MgO	0,12	98,8
AL-63	MgCl ₂	0,11	98,9	AL-76	MgO	1,02	89,8
AL-64	MgCl ₂	0,2	98	AL-77	MgO	1,96	80,4
AL-65	MgCl ₂	0,01	99,9	AL-78	MgO	1,04	89,6
AL-66	MgCl ₂	0,01	99,9	AL-79	MgO	1,36	86,4

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme apresentado nas Tabelas 3, 4 e 5, é possível perceber que a faixa de pH compreendida entre 8,0 e 11,0 foi propícia para a recuperação do fósforo em algumas das alíquotas da Etapa 2, da mesma forma que se obteve êxito para algumas alíquotas nos testes variando o pH de 8,5 a 9,5 na Etapa 3. Todavia, de posse dos dados da Etapa 3, os quais são mais exatos em comparação aos resultados qualitativos obtidos da Etapa 2, nota-se que os valores de pH que proporcionaram maiores remoções de fósforo no efluente foram 8,5 e 9,5 (vide Tabela 5).

Alguns estudos trazem informações pertinentes acerca de condições de pH favoráveis à formação da estruvita, ou seja, da remoção de fósforo empregando fontes alternativas de magnésio como $MgCl_2$ e MgO . Memelli (2019), após representação gráfica do gradiente de concentração de fósforo (em mg/L) em função do pH versus tempo de precipitação (em minutos) após a adição de MgO e $MgCl_2$ em urina humana, observou o decaimento do fósforo mais acentuado na faixa de pH de 8,0 a 10,0. Katakai et al. (2016), em seu artigo de revisão, traz como informação a faixa de pH 8,5 a 8,8 como faixa favorável de recuperação de estruvita utilizando MgO como fonte de magnésio. Conforme Wang et al. (2017), o valor de pH ótimo de operação obtido foi 8,5, uma vez que proporcionou remoção de fósforo total superior a 70% e trouxe uma boa relação entre custo e eficiência no processo. Portanto, os resultados qualitativos obtidos a partir das alíquotas geradas nesta Etapa 2 e os resultados obtidos a partir da análise das alíquotas da Etapa 3 são condizentes com as informações de pH favoráveis à formação da estruvita e recuperação de fósforo presentes na literatura.

CONCLUSÕES

Baseado nos dados obtidos das Etapas 2 e 3, foi possível notar que os resultados obtidos a partir dos testes da Etapa 3 foram os mais elucidativos em relação à performance dos dois coagulantes, cloreto de magnésio e óxido de magnésio, na recuperação do fósforo do efluente de estudo.

Em termos de pH, pode-se considerar que a faixa de pH entre 8,5 e 10,5 mostrou-se propícia para uma maior remoção de fósforo do meio, porém, os valores de pH 8,5 e 9,5 apresentaram, no geral, melhores resultados para recuperação do nutriente. No que tange à outra variável principal dos testes, isto é, a massa de dosagem dos coagulantes, os resultados da Etapa 3 deixaram claro que a massa de 1,5g, adotada para o teste RF-3, foi a mais eficiente dentro do objetivo de recuperação do fósforo. E, estabelecendo uma comparação de eficiência entre as duas fontes de magnésio, é possível perceber que, 9 dos 12 resultados referentes ao reagente $MgCl_2$ na Etapa 3 apresentaram concentração inferior a 1 mg P/L, superando os resultados de MgO .

Portanto, tendo como respaldo os resultados obtidos neste estudo, foi possível concluir que o reagente cloreto de magnésio, $MgCl_2$, ofereceu um desempenho ligeiramente melhor em relação ao óxido de magnésio e que as melhores condições para remoção de fósforo do efluente foram em pH entre 8,5 e 9,5, utilizando dosagem de 1,5g de reagente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, universidade e instituição de fomento, à minha orientadora Profa. Dra. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli, ao companheiro de projeto Denilton da Conceição Fritz Junior e ao Prof. Dr. Matheus Pereira Postigo, pela colaboração com materiais necessários à realização dos testes de bancada. Agradeço também à indústria de bebidas dos Campos Gerais provedora do efluente de estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods of Examination of Water and Wastewater**, 23rd ed., Washington, D.C, 2017.

BAKARE, B. F., SHABANGU, K., CHETTY, M. Brewery wastewater treatment using laboratory scale aerobic sequencing batch reactor. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p. 128–134, 2017. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S102691851630049X>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

CASTRO, S.R. **Precipitação de estruvita: recuperação de nitrogênio e fósforo utilizando fontes alternativas de reagentes**. 2014. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9MHL7Z>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

CHAO, I. R. S., MORITA, D. M. **Remoção de fósforo de efluentes de estação de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2006. Disponível em: < <https://repositorio.usp.br/item/001564132>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

CORDELL, D., DRANGERT, J.-O., WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19), p. 292–305, 2009. Disponível em: < <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

GUALBERTO, F. F. **Otimização de processo de precipitação química na remoção de fósforo de esgotos sanitários mediante a utilização de sais de ferro como coagulante**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2009. Disponível em: < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-20072009-150538/pt-br.php>>. Acesso em: 19 mai. 2020

HECKENMÜLLER, M., NARITA, D., KLEPPER, G. Global availability of phosphorus and its implications for global food supply: An economic overview. **Kiel Working Paper**, No. 1897, Kiel Institute for the World Economy (IfW), Kiel, 2014. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10419/90630>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

KATAKI, S. et al. **Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 107, p. 142- 156, 2016. Disponível em: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.12.009#>. Acesso em: 19 mai. 2020.

LI, B. et al. Phosphorous recovery through struvite crystallization: Challenges for future design. *Science of Total Environment*, v. 648, p. 1244- 1256, 2018. Disponível em: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.166/>. Acesso em: 19 mai. 2020.

MEMELLI, M. S. **Produção de estruvita (MgNH₄PO₄·6H₂O) a partir da urina humana a partir da precipitação induzida por íons de magnésio.** 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Vitória, 2019. Disponível em: < <http://repositorio.ufes.br/handle/10/11050>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

PRADEL, M., AISSANI, L. Environmental impacts of phosphorus recovery from a “product” Life Cycle Assessment perspective: Allocating burdens of wastewater treatment in the production of sludge-based phosphate fertilizers. *Science of The Total Environment*, v. 656, p. 55–69, 2019. Disponível em: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.356>. Acesso em: 25 ago. 2020.

SANTOS, W. R. B. dos. **Remoção de nitrogênio ou fósforo presente em efluentes agroindustriais pela precipitação de estruvita.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7950>. Acesso em: 14 fev. 2020.

SHADDEL, S. et al. Crystallization kinetics and growth of struvite crystals by seawater versus magnesium chloride as magnesium source: towards enhancing sustainability and economics of struvite crystallization. *Chemosphere*, v. 256, 126968, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520311619>. Acesso em: 19 mai. 2020.

SOUSA, P. L. R. de. **Avaliação da biodegradação do dibenzotiofeno utilizando lodos ativados.** 2015. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/20027>. Acesso em: 14 fev. 2020.

WANG, J. et al. Selection of cost-effective magnesium sources for 2 fluidized struvite crystallization, **Journal of Environmental Sciences**, 2017. Disponível em: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.11.029> . Acesso em: 19 mai. 2020.

WU, Y. et al. Potentials and challenges of phosphorus recovery as vivianite from wastewater: A review. **Chemosphere**, v. 226, p. 246–258, 2019. Disponível em: <https://sci-hub.tw/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.138>. Acesso em: 19 mai. 2020.