



IV CONGRESSO ON-LINE INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE

PRECIPITAÇÃO DE ESTRUVITA A PARTIR DE EFLUENTE MISTO: REVISÃO DA LITERATURA

THAÍS DE SOUZA MIRANDA; MARCOS GAGLIARDI DE SOUZA; EDGARD
HENRIQUE OLIVEIRA DIAS; SAMUEL RODRIGUES CASTRO

RESUMO

O crescimento populacional traz consigo o aumento na produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e, por conseguinte, uma elevação na geração de lixo. Simultaneamente, o número de estações de tratamento de esgoto tem se expandido, o que resulta em um maior volume a ser tratado. Uma abordagem interessante para lidar com esses desafios é a integração do lixo ao aterro sanitário ao esgoto sanitário em estações de tratamento já existentes. Essa prática não apenas reduz os custos associados ao tratamento do lixo, mas também minimiza os impactos ambientais decorrentes desse resíduo. A precipitação de estruvita a partir de efluentes mistos emerge como uma técnica promissora para o tratamento de resíduos, destacando-se pela sua eficácia na recuperação de nutrientes valiosos, como nitrogênio e fósforo. Este trabalho se propõe a realizar uma revisão bibliográfica abordando o processo de recuperação de nutrientes por meio da precipitação química de estruvita, bem como sua eficiência na remoção de contaminantes em efluentes combinados. Os estudos revisados evidenciam a capacidade da precipitação química em reduzir as concentrações de nitrogênio amoniacal e fósforo, contribuindo significativamente para mitigar os impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado desses efluentes. A otimização de parâmetros como pH, proporções de nutrientes e condições de supersaturação emerge como fator crítico para o sucesso desse processo. Entretanto, ressalta-se a necessidade premente de estudos mais aprofundados, especialmente focados em efluentes mistos. Essas pesquisas são cruciais para aprimorar a eficiência da técnica, promovendo práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

Palavras-chave: recuperação de nutrientes; lixo; esgoto sanitário; fertilizante; amônia.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem como uma de suas consequências o aumento na produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) (NASCIMENTO; CRUZ, 2017). De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022 (ABRELPE, 2022), a geração de RSU durante o ano mencionado totalizou aproximadamente 81,8 milhões de toneladas.

O líquido escuro resultante de aterros sanitários, também conhecido como lixo, pode apresentar diversas características, incluindo concentrações elevadas de nitrogênio amoniacal, cloretos, matéria orgânica e compostos orgânicos de difícil decomposição. Devido a essas características, é essencial que o líquido seja submetido a um tratamento apropriado para que seus parâmetros físicos, químicos e biológicos estejam em conformidade com os limites estabelecidos pelas legislações vigentes, evitando impactos adversos no meio ambiente (KAWAHIGASHI *et al.*, 2014).

De acordo com a coleta de dados do Sistema Nacional de Saneamento (SNIS) 2022, com 2021 como ano de referência, dos 4.774 municípios participantes do SNIS-AE 50% contaram com sistemas públicos de esgotamento sanitário. Além disso, o volume de esgotos coletado chegou a 6,0 bilhões de m³ e o de esgoto tratado, a 4,9 bilhões de m³ (SNIS, 2022).

O aumento no número de estações de tratamento de esgoto e o consequente aumento no volume de tratamento pode estar diretamente ligados à crescente demanda da sociedade por água potável e ao acesso ao saneamento. No entanto, é importante observar que muitos cursos d'água estão sofrendo processos de degradação, o que torna essencial a aplicação de técnicas eficazes no tratamento de efluentes (BATISTA; SOUZA, 2020; URBAN; ISAAC; MORITA, 2020).

O tratamento combinado de efluentes consiste no lançamento do lixiviado junto ao afluente de estações de tratamento de esgoto (ETEs), devendo resultar em um efluente tratado que atenda às exigências legais (FERREIRA *et al.*, 2009). Esse tipo de tratamento tem demonstrado um desempenho satisfatório em comparação com outros métodos, tanto na eliminação de substâncias orgânicas como na remoção de nitrogênio amoniacal, alcançando uma eficiência média de remoção de cerca de 67% e 73%, respectivamente (ALBUQUERQUE; POVINELLI, 2011).

A estruvita é uma substância cristalina de cor branca, composta por magnésio hexahidratado e o fosfato de amônio ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sendo uma fonte rica em fósforo (LIU *et al.*, 2016).

O processo de recuperação de estruvita envolve várias etapas, incluindo coleta e preparo da amostra, verificação e ajuste de pH, adição do composto de magnésio, a precipitação química em si com os estágios de nucleação e crescimento, a sedimentação dos cristais de estruvita e a filtração da solução. A precipitação química de estruvita pode ser realizada usando a adição de compostos de magnésio (LATIFIAN; HOLST; LIU, 2013) como óxido de magnésio (MgO), cloreto de magnésio (MgCl_2), sulfato de magnésio (MgSO_4) ou hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2) (CRUTCHIK; GARRIDO, 2011).

A recuperação de nutrientes por meio da precipitação de estruvita pode ser aplicada a diversas fontes de águas residuárias, e sua eficiência depende de vários fatores, como pH, razão molar de P:N:Mg, temperatura, tempo de reação, taxa de aeração, tipo do reator e presença de matéria orgânica (RAHMAN *et al.*, 2014; LIU; KUMAR; KWAG, 2013).

O fósforo desempenha um papel crucial no crescimento humano, nos processos genéticos (WU *et al.*, 2019), na produção de alimentos em escala global e na fabricação de fertilizantes (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). No entanto, é um recurso finito, extraído de rochas fosfáticas, que pode se tornar escasso devido à crescente demanda industrial e agrícola (HECKENMÜLLER; NARITA; KLEPPER, 2014). No entanto, o fósforo é frequentemente encontrado em efluentes líquidos (PRADEL; AISSANI, 2019), cuja disposição inadequada acelera a eutrofização de corpos d'água, causando sérios danos ambientais. Nesse contexto, a recuperação de fósforo na forma de estruvita revela um grande potencial para abordar ambas as questões simultaneamente.

A precipitação de estruvita a partir de efluentes mistos está diretamente relacionada a alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, com ênfase especial em questões relacionadas à água, saneamento, proteção do meio ambiente e práticas agrícolas sustentáveis; como o objetivo 6 “Água Potável e Saneamento”, o objetivo 12 “Produção e Consumo Sustentáveis”, o objetivo 13 “Ação Contra a Mudança Global do Clima”, o objetivo 14 “Vida na Água” e o objetivo 15 “Vida Terrestre”.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise da literatura existente sobre o processo de precipitação de estruvita a partir de efluentes mistos, destacando as técnicas, os desafios e os benefícios associados a esse processo, visando contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis na gestão de resíduos e na recuperação de nutrientes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo é resultado de uma revisão bibliográfica que se concentrou na análise qualitativa das publicações relacionadas à remoção de nitrogênio e fósforo através da precipitação na forma de estruvita, e sua aplicação no tratamento conjunto de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico. Tecnicamente, essa pesquisa se enquadra na categoria de pesquisa bibliográfica. Para conduzir a revisão bibliográfica, foi empregada a metodologia de revisão sistemática da literatura, uma abordagem que permite identificar, avaliar e interpretar dados de pesquisas, bem como analisar as tendências relevantes em um determinado campo, auxiliando na identificação das lacunas no conhecimento acadêmico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, os estudos sobre estruvita concentravam-se em estratégias para evitar sua precipitação, devido ao entupimento de tubulações por cristais de estruvita, o que reduzia a eficiência dos sistemas de tratamento de efluentes (KATAKI *et al.*, 2016). No entanto, atualmente, há uma série de pesquisas voltadas para a recuperação de nutrientes, como nitrogênio e fósforo (ABEL-DENEE *et al.*, 2018; AMINI *et al.*, 2017; CRUTCHIK *et al.*, 2018; HERMASSI *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2016; ZIN; TIWARI; KIM, 2020), ou exclusivamente fósforo (AGRAWAL *et al.*, 2018; CRUTCHIK *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2017; LU *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2020; WARD *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2018). Além disso, são encontrados estudos que analisam a formação da estruvita (AGRAWAL; GUEST; CUSICK, 2018) ou o desempenho dos reatores utilizados (AGUADO *et al.*, 2019).

De acordo com Wang *et al.* (2013), a formação de estruvita ocorre quando as concentrações de Mg , NH_4^+ e PO_4^- ultrapassam o limite de solubilidade, exigindo, em certas situações, a adição de sais de magnésio e fosfato, além do amônio no sistema. No entanto, a recuperação da estruvita enfrenta desafios, especialmente devido à natureza heterogênea da fonte e às demandas por insumos químicos extras, o que tem gerado crescente preocupação com os aspectos técnico-econômicos (KATAKI *et al.*, 2016). Assim, pesquisas estão sendo conduzidas para aprimorar a técnica por meio do uso de fontes alternativas de reagentes para a suplementação dos sais necessários ao processo (AGUADO *et al.*, 2019; CRUTCHIK *et al.*, 2017; HUANG *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2016), visando reduzir custos e aumentar a eficiência do procedimento.

O tratamento combinado de chorume com esgoto doméstico é uma estratégia implementada em algumas ETEs no Brasil. Essa abordagem visa integrar o lixiviado de aterro sanitário ao esgoto sanitário em unidades de tratamento já existentes. No contexto brasileiro, onde o aterro sanitário é a principal forma de disposição final dos RSU coletados, essa alternativa se destaca por eliminando os custos e impactos ambientais associados ao tratamento separado do lixiviado (LEITE *et al.*, 2016).

O tratamento combinado tem vantagens, como a redução da carga de poluentes inibidores dos processos biológicos e o aumento da biodegradabilidade do lixiviado. Contudo, sua aplicação requer considerações específicas, como a capacidade de assimilação da ETE, a compatibilidade do processo com as características do lixiviado e o manejo do lodo produzido (FERREIRA *et al.*, 2009; MANNARINO *et al.*, 2011; RENOU *et al.*, 2008).

Apesar disso, a maioria dos estudos sobre a precipitação de estruvita se concentra na recuperação de nutrientes em tratamentos distintos para lixiviado (DINIZ, 2010; PAIXÃO FILHO, 2017; HUANG, 2014) e esgoto sanitário (MENDES, 2022; SÁNCHEZ LEDESMA, 2014; YETILMEZSOY; SAPCI-ZENGİN, 2009). Portanto, há uma escassez de pesquisas abordando efluentes combinados (lixiviado e esgoto sanitário).

Para a composição do efluente misto, a mistura entre lixiviado e esgoto doméstico varia nas proporções de 1% a 10% (ALBUQUERQUE, 2018; ALTINBAS; YANGIN-GÖMESÇ; OZTURK, 2002; BAETTKER, 2019; FERRAZ, 2014; GALVÃO *et al.* 2018; LEITE *et al.*, 2016). No estudo conduzido por Fagundes (2022) no município de Juiz de Fora, observaram-se resultados positivos na precipitação química de estruvita em efluente misto contendo 10% de lixiviado. Já em estudo realizado em Istanbul, a proporção contendo 3% de lixiviado apresentaram melhores resultados para precipitação de estruvita (ALTINBAS; YANGIN-GÖMESÇ; OZTURK, 2002). Essas discrepâncias nas proporções de lixiviado podem estar relacionadas à composição específica do efluente doméstico.

Nos estudos supracitados, a faixa ideal de pH para a formação de estruvita varia de 8,5 a 10,0 e a razão molar (Mg:N:P) ocorre convergências entre os estudos. Em relação aos parâmetros operacionais inerentes à precipitação, o tempo reacional varia de 15 a 30 minutos.

Nos estudos específicos sobre a precipitação de estruvita de efluentes combinados, para a condição otimizada, Fagundes (2022) evidencia pH de 8,5, relação Mg:N de 1,0 e relação P:N de 1,5, resultando em remoções de $77,8 \pm 0,6\%$, $28,8 \pm 1,1\%$ e $69,5 \pm 7,2\%$ para nitrogênio amoniacal, DQO e fósforo total, respectivamente. Já o estudo de Altinbas, Yangin-Gömeç e Ozturk (2002) a remoção máxima (68% de N-NH₄) foi alcançada com pH de 9,2 e razão estequiométrica (Mg:N:P) de 1,1:1:1.

Esses resultados reforçam a importância de ajustes de acordo com as especificidades do efluente nos parâmetros de precipitação, como pH e razões molares, para otimizar a formação de estruvita em efluentes combinados.

4 CONCLUSÃO

Em conclusão, a revisão bibliográfica sobre a precipitação de estruvita a partir de efluentes combinados revela a crescente relevância dessa técnica na recuperação de nutrientes. Os estudos destacam a eficácia da precipitação química para reduzir as concentrações de nitrogênio amoniacal e fósforo, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao lançamento inadequado desses efluentes. Além disso, a otimização de parâmetros como pH, proporções de nutrientes e condições de supersaturação demonstra ser crucial para o sucesso do processo. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de mais pesquisas focadas em efluentes mistos, a fim de aprimorar a eficiência dessa técnica e promover práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos.

REFERÊNCIAS

ABEL-DENEE M.; ABBOTT T; ESKICIOGLU C. Using mass struvite precipitation to remove recalcitrant nutrients and micropollutants from anaerobic digestion dewatering centrate. **Water Research**, v. 132, p. 292-300, 01 abr. 2018.

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2022.

AGRAWAL, S.; GUEST, J. S.; CUSICK, R. D. Elucidating the impacts of initial supersaturation and seed crystal loading on struvite precipitation kinetics, fines production, and crystal growth. **Water Research**, v. 132, p. 252-259, jan. 2018.

AGUADO, D. *et al.* P-recovery in a pilot-scale struvite crystallisation reactor for source separated urine systems using seawater and magnesium chloride as magnesium sources. **Science of the Total Environment**, v. 672, p. 88–96, 2019.

ALBUQUERQUE, E. M.; POVINELLI, J.. (2011) Caracterização da eficiência dos processos de tratamento de lixiviado de aterro sanitário no Brasil. *In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Porto Alegre-RS. **Trabalhos técnicos 26º CBESA**, 2011.

ALTINBAS, M.; YANGIN-GÖMEÇ, C.; OZTURK, I. (2002). Struvite precipitation from anaerobically treated municipal and landfill wastewaters. **Water Science and Technology**, 46(9), 271–278.

AMINI, A.*et al.* Cost-effective treatment of swine wastes through recovery of energy and nutrients. **Waste Management**, v. 69, p. 508-517, nov. 2017.

BATISTA, L. F.; SOUZA, M. A. A. Aptidão dos lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal para condicionamento, utilização e disposição final. **Revista DAE**, v. 68, n. 226, p. 179-195, 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.

CRUTCHIK, D. *et al.* Biorefinery of cellulosic primary sludge towards targeted Short Chain Fatty Acids, phosphorus and methane recovery. **Water Research**, v. 136, p. 112 - 119, 2018.

CRUTCHIK, D. *et al.* Evaluation of a low-cost magnesium product for phosphorus recovery by struvite crystallization. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 93, n. 4, p. 1012–1021, 2017.

CRUTCHIK, D.; GARRIDO, J. M. Struvite crystallization versus amorphous magnesium and calcium phosphate precipitation during the treatment of a saline industrial wastewater. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 12, p. 2460-2467, 2011.

FERREIRA, J.A.; CANTANHEDE, A.L.G.; LEITE, V.L.; BILA, D.M.; CAMPOS, J.C.; YOKOYAMA, L.; FIGUEIREDO, I.C.; MANNARINO, C.F., SANTOS, A.S., FRANCO, R.S.O.; LOPES, W.S.; SOUSA, J.T. (2009) Tratamento combinado de lixiviados de aterros de resíduos sólidos urbanos com esgoto sanitário. *In: GOMES, L.P. Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para condições brasileiras. Livro 3 do Projeto PROSAB*. Rio de Janeiro: **ABES**, 2009. 360 p.

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.

HERMASSI, M. *et al.* Simultaneous ammonium and phosphate recovery and stabilization from urban sewage sludge anaerobic digestates using reactive sorbents. **Science of the Total Environment**, v. 630, p. 781–789, 2018.

HUANG, H. *et al.* Feasibility of physicochemical recovery of nutrients from swine wastewater: Evaluation of three kinds of magnesium sources. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 70, p. 209 - 218, jan. 2017.

HUANG, H.; YANG, J.; LI, D. (2014). Recovery and removal of ammonia-nitrogen and

phosphate from swine wastewater by internal recycling of struvite chlorination product. **Bioresource Technology**, 172(2014), 253–259.

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.

KAWAHIGASHI, F. *et al.*. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 235–244, jul. 2014.

LATIFIAN, M., HOLST, O., LIU, J. Nitrogen and phosphorus removal from urine by sequential struvite formation and recycling process. **Clean-Soil Air Water** 41, 1–5, 2013.

LEITE, V. D. *et al.*. Tratamento conjugado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico em lagoas de estabilização. **Revista DAE**, v. 65, n. 207, p. 77-93, 2017.

LIU Y, H., KUMAR, S., KWAG, J. H, RA, CS. Magnesium ammonium phosphate formation, recovery and its application as valuable resources: a review. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 8 (2), p. 181–189, 2013.

LIU, X.; YI, T.; WEN, G.; KONG, F.; ZHANG, X.; HU, Z. Influence of soil and irrigation water pH on the availability of phosphorus in struvite derived from urine through a greenhouse pot experiment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.64, p.3324–3329, 2016.

LU, B. *et al.* Phosphorus removal and recovery from wastewater by highly efficient struvite crystallization in an improved fluidized bed reactor. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 11, p. 2879–2885, 2017.

MANNARINO, C. F., FERREIRA, J. A., MOREIRA, J. C.; Tratamento Combinado de Lixiviado de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos e Esgoto Doméstico como Alternativa para a Solução de um Grave Problema Ambiental e de Saúde Pública – Revisão Bibliográfica, **Caderno de Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, 2011, p. 11-9.

NASCIMENTO, C. M. T.; CRUZ, M. L. B. Resíduos sólidos: presença e ameaça no espaço geográfico. **GeoTextos**, [S. l.], v. 13, n. 2, 2017. DOI: 10.9771/1984-5537geo.v13i2.24581.

PAIXÃO FILHO, Jorge Luiz da. **Lixiviado de aterro sanitário: alternativas de tratamento para o cenário brasileiro**. Orientador: Prof. Dr. Adriano Luiz Tonetti. 2017. 246 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2017.

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 sludgebased phosphate fertilizers. **Science of The Total Environment**, v. 656, p. 55–69, 2019.

RAHMAN, M.M., SALLEH, M.A.M., RASHID, U., AHSAN, A., HOSSAIN, M.M., RA, C.S. Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization – a review. **Arab. J. Chem.** 7, 139–155, 2014.

RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P.; Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity, **Journal of Hazardous Materials**, vol. 150, n. 3, 2008, p. 468–493.

SÁNCHEZ LEDESMA, Lina Marcela. **Produção de estruvita a partir de esgoto doméstico**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS.
Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2021. Brasília, dez. 2022.

URBAN, R. C.; ISAAC, R. L; MORITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**, v. 67, n. 219, 2019.

WANG, H. *et al.* Optimization and reaction kinetics analysis for phosphorus removal in struvite precipitation process. **Water Environment Research**, v. 92, n. 8, p. 1162–1172, 2020.

WANG, H. *et al.* Recovery of nutrients from wastewater by a MgCl₂ modified zeolite and their reuse as an amendment for Cu and Pb immobilization in soil. **RSC Advances**, v. 6, p. 55809–55818, 02 jun. 2016.

WANG, X. *et al.* Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation. **Bioresource Technology**, v. 147, p. 17–22, 2013.

WARD, A.J.; AROLA, K.; BREWSTER E. T.; MEHTA C. M.; BATSTONE D. J. Nutrient recovery from wastewater through pilot scale electrodialysis. **Water Research**, v. 135, p. 57-65, 08 fev. 2018.

WU, Z. *et al.* Forward osmosis promoted in-situ formation of struvite with simultaneous water recovery from digested swine wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 342, p. 274-280, 2018.

WU, Y. *et al.* Potentials and challenges of phosphorus recovery as vivianite from wastewater: A review. **Chemosphere**, v. 226, p. 246–258, 2019.

YETILMEZSO, Y. K.; ZENGİN, Z. S. (2009). Recovery of ammonium nitrogen from the effluent of UASB treating poultry manure wastewater by MAP precipitation as a slow release fertilizer. **Journal of Hazardous materials**, v.166, n.1, p.260-269.

ZIN, M. M. T.; TIWARI, D.; KIM, D. J. Maximizing ammonium and phosphate recovery from food wastewater and incinerated sewage sludge ash by optimal Mg dose with RSM. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 86, p. 136–143, 2020.