

SUSTENTABILIDADE HÍDRICA: REUSO DE ÁGUA E SÍNTESE DE ESTRUVITA A PARTIR DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS

Jolene Rodrigues Lopes – jolene.lopes41@gmail.com

Universidade Federal do Oeste do Pará

Endereço: Av Orquídea, nº 270, Jardim Santarém

68030-520 – Santarém – Pará

Rose Caldas de Souza Meira – rosemeira@ufpa.br

Universidade Federal do Oeste do Pará

Ozilene Maria Cativo Guimarães - ozilene.guimaraes6@gmail.com

Universidade Federal do Oeste do Pará

Dayse Drielly Souza Santana Vieira - dayse.vieira@ufopa.edu.br

Universidade Federal do Oeste do Pará

Manoel Roberval Pimentel dos Santos – manoel.pimentel@ufopa.edu.br

Universidade Federal do Oeste do Pará

Resumo: O presente estudo investigou o potencial de utilização de água reciclada de efluentes agroindustriais tratados para fertirrigação, através do processo de precipitação de estruvita. A pesquisa concentrou-se em determinar os níveis de nutrientes como NH_3 , P e Mg no efluente antes e após o tratamento. As amostras coletadas foram submetidas a análises para caracterizar a água reciclada e avaliar sua viabilidade como fonte de nutrientes para cultivos agrícolas. O método de tratamento utilizou o efluente como fonte de fósforo para a síntese de estruvita, após o tratamento, a água resultante foi armazenada e submetida a testes para quantificar seu conteúdo fertilizante. Os resultados revelaram que a água tratada é rica em nutrientes, apresentando concentrações benéficas para a fertirrigação, particularmente para as condições do solo na Amazônia, que é naturalmente deficiente em nutrientes.

.

Palavras-chave: Reuso de Água, Síntese de Estruvita, Efluentes Agroindustriais, Recuperação de Nutrientes, Fertirrigação.

WATER SUSTAINABILITY: REUSE OF WATER AND SYNTHESIS OF STRUVITE FROM AGRO-INDUSTRIAL EFFLUENTS

Abstract: This study investigated the potential of using recycled water from treated agro-industrial effluents for fertigation, through the process of struvite precipitation. The research focused on determining the levels of nutrients such as NH_3 , P, and Mg in the effluent before and after treatment. The samples collected and subjected to analyses to characterize the recycled water and evaluate its viability as a nutrient source for agricultural crops. The treatment method used the effluent as a source of phosphorus for struvite synthesis. After treatment, the resulting water was stored and subjected to tests to quantify its fertilizing content. The results revealed that the treated water is rich in nutrients, presenting beneficial concentrations for fertigation, particularly for soil conditions in the Amazon, which is naturally deficient in nutrients.

Keywords: Water Reuse, Struvite Synthesis, Agro-Industrial Effluents, Nutrient Recovery, Fertigation

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos e a intensificação das atividades agroindustriais têm colocado em evidência a necessidade de soluções sustentáveis para o manejo e reuso de água. Dentre essas soluções, a síntese de estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), um composto que pode ser obtido a partir de efluentes agroindustriais e utilizado como fertilizante, contribuindo para a sustentabilidade hídrica e agrícola (ALEGRE, 2022).

Os efluentes agroindustriais, em sua maioria, são ricos em nutrientes como fósforo e nitrogênio, representando uma fonte potencial para a recuperação desses elementos por meio da precipitação da estruvita. Este processo diminui a carga de nutrientes nos corpos hídricos, previne a eutrofização e possibilita o reuso de água tratada, principalmente em regiões com escassez hídrica (SANTOS et al., 2011).

No entanto, os cultivos produzidos na região amazônica enfrentam desafios relacionados à nutrição das plantas e ao manejo do solo, aspectos essenciais para maximizar a produtividade e a qualidade dos frutos (PEREIRA, 2016). A fertilização adequada, em particular, afeta diretamente o desenvolvimento das plantas, influenciando a produção de biomassa, a resistência a doenças e a qualidade final do fruto (MENDES, 2022). Tradicionalmente, a adubação química é a prática mais comum, mas seu uso excessivo pode levar à degradação do solo e a impactos ambientais negativos (DO NASCIMENTO RODRIGUES et al., 2020).

Em busca de práticas agrícolas mais sustentáveis, o uso de efluentes agroindustriais tratados como fonte de nutrientes tem se destacado no cenário ambiental. Esses efluentes ricos em nutrientes como fósforo, amônia e magnésio oferecem uma alternativa viável para a fertirrigação, contribuindo para a redução do uso de fertilizantes químicos e o reaproveitamento de resíduos industriais (CARVALHO et al., 2023). Estudos anteriores indicam que a aplicação de efluentes pode melhorar a fertilidade do solo e aumentar a



produtividade das culturas, ao mesmo tempo em que minimiza o impacto ambiental do descarte inadequado desses resíduos (GERHARDT; REISDORFER; CARDOSO, 2018).

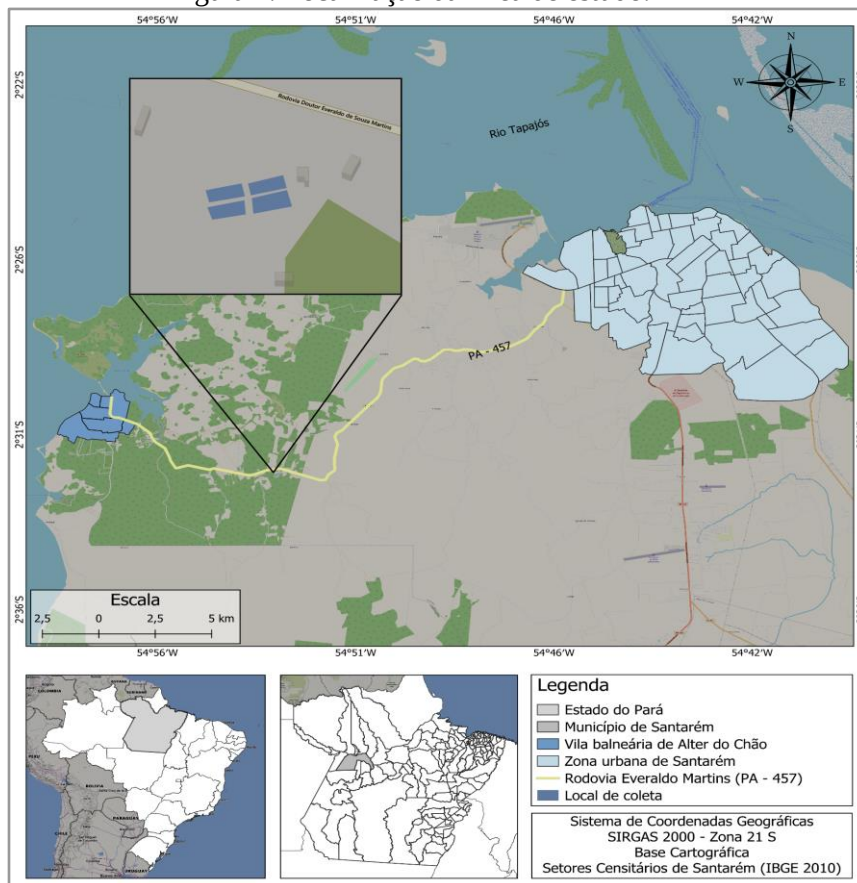
Estudos recentes têm demonstrado a viabilidade técnica e econômica da recuperação de estruvita a partir de efluentes agroindustriais, pois seu impacto é positivo na gestão de recursos hídricos e na mitigação de impactos ambientais (MEIRA, 2020). A implementação de tecnologias de reuso de água e recuperação de nutrientes está alinhada com os princípios de economia circular e sustentabilidade, favorecendo uma estratégia abrangente para a gestão de recursos na agroindústria (MENDES, 2022).

Dessa forma, este artigo tem como objetivo investigar a eficiência da recuperação de nutrientes a partir de efluentes agroindustriais através da síntese de estruvita e avaliar os efeitos da aplicação destes efluentes tratados na nutrição e no crescimento de mudas de plantas, alinhando com a sustentabilidade hídrica e agrícola.

2. METODOLOGIA

O efluente tratado e avaliado neste trabalho foi coletado de uma atividade agroindustrial, localizado nas proximidades da PA-457 (2,53719572° S e 58,88044153° W), rodovia de acesso à Alter do Chão, em Santarém, Oeste do Pará.

Figura 1. Localização da Área de estudo.



A pesquisa foi conduzida em Santarém, Pará, e envolveu a coleta de 25 litros de efluente agroindustrial em recipientes de armazenamento com tampas vedadas, mantidos à temperatura ambiente. O experimento foi realizado de acordo com as diretrizes estabelecidas por Meira (2020) para a caracterização adequada do efluente e condição otimizada da síntese de estruvita. O experimento agrônômico foi realizado na casa de vegetação do Campus Juruti da Universidade Federal do Oeste do Pará.

A síntese de estruvita foi realizada em bancada, seguindo um procedimento detalhado. Inicialmente, as soluções de magnésio, fósforo e amônia foram preparadas e misturadas na proporção molar 1:1:1, com o ajuste do pH utilizando hidróxido de sódio. A mistura foi composta por 600 mL de cloreto de magnésio hexahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 600 mL de fosfato monobásico de potássio (K_2PO_4) + efluente, 590 mL de cloreto de amônio (NH_4Cl), e 210 mL de água destilada, totalizando um volume de 2 litros. A solução foi então agitada mecanicamente por 10 minutos e o pH foi ajustado para 10 com hidróxido de sódio 1N, utilizando papel indicador de pH para monitoramento. Após 20 minutos de repouso à temperatura ambiente, a solução foi filtrada, e o sólido retido foi levado à estufa a 40°C por 24 horas para secagem. A água tratada resultante foi armazenada em galões de 5 litros para posterior caracterização.

As análises dos teores de nitrogênio e fósforo foram realizadas utilizando um equipamento multiparâmetro (Hanna) no Laboratório de Química Aplicada da Universidade Federal do Oeste do Pará. As amostras foram preparadas e reagentes específicos foram adicionados para a quantificação dos nutrientes, seguindo as instruções do manual do equipamento.

Para a análise de fósforo, 10 mL da amostra foram transferidos para uma cubeta, e após o ajuste do zero no equipamento, foram adicionadas 10 gotas do reagente Phosphorus gama alta HI93706A-0, seguido pelo reagente HI93706B-01. Após o tempo de reação indicado, a leitura quantitativa foi realizada. Para a análise de amônia, o mesmo procedimento inicial foi seguido, com a adição de 4 gotas do reagente gama média HI93715A-0 e, em seguida, 4 gotas do reagente HI93715B-0, aguardando o tempo de reação indicado para a leitura quantitativa.

Para quantificar a concentração do íon magnésio (Mg^{2+}), foi empregado o método de titulação, no qual se mediu inicialmente a dureza total e a dureza do cálcio na amostra. A partir desses valores foi possível calcular a dureza do magnésio, que é a diferença entre a dureza total e a dureza do cálcio. A determinação desses parâmetros seguiu o protocolo descrito no manual de instruções do kit de dureza total, cálcio e magnésio, utilizando três reagentes específicos. O primeiro reagente é uma solução tampão que ajusta o pH da amostra, adicionando quatro gotas. O segundo reagente, o negro de eriocromo T, é um indicador que muda de cor conforme a concentração de íons na amostra. O terceiro reagente é uma solução padrão de EDTA, que é adicionada gota a gota através de uma seringa milimétrica, permitindo a titulação e a indicação da dureza na amostra.

Para avaliar a dureza total, a amostra foi colocada em uma cubeta de 10 mL, a qual recebeu quatro gotas do primeiro reagente, sendo agitada em movimentos circulares. Em seguida, foi adicionado o segundo reagente, e a agitação continuou até a amostra ficar lilás. Se a amostra ficasse azul, indicaria ausência de dureza, resultando zero. Após isso, o terceiro reagente foi adicionado gota a gota, com agitação após cada gota, até a amostra atingir uma coloração azul pura. Para medir a dureza do cálcio, a amostra foi colocada em uma cubeta de 10 mL, recebendo quatro gotas do primeiro reagente e sendo agitada em movimentos circulares. Com a adição do segundo reagente, a amostra deve ficar rosa. Se ficasse violeta, indicaria ausência de dureza, resultando zero. Por fim, o terceiro reagente foi adicionado gota a gota, com agitação após cada gota, até a amostra atingir uma coloração violeta.

Para a avaliação do potencial fertilizante da água reciclada foi aplicada via fertirrigação nas mudas de maracujazeiro onde foram submetidas a diferentes tratamentos com doses específicas de efluentes, os tratamentos foram aplicados de acordo com um delineamento experimental apropriado. Durante 49 dias, várias medições foram realizadas para avaliar o desenvolvimento das mudas, incluindo altura, diâmetro do caule, número de folhas, volume e peso fresco e seco das raízes, e peso fresco e seco das partes aéreas.



Os dados coletados foram submetidos a análises estatísticas, como ANOVA e testes de comparação de médias, para avaliar a significância dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES

Tabela 1. Dados referentes à caracterização do efluente pré e pós tratado (água reciclada).

Réplicas	Nutrientes (mg/L)		
	NH ₃	P	Mg
Efluente pré tratado	590	600	600
Efluente pós tratado	12,16	0,83	50,2

A análise química do solo é o ponto de partida para compreensão do experimento, fornecendo uma base para avaliar o impacto dos tratamentos. O solo utilizado foi analisado quanto à sua fertilidade, com atenção para os níveis de macronutrientes essenciais, como fósforo (P), Amônia (NH₃), Magnésio (Mg) e matéria orgânica, que são críticos para o desenvolvimento das plantas. O pH do Solo deve estar equilibrado para a disponibilidade de nutrientes, a análise mostrou que o solo possuía um pH adequado para o cultivo de maracujazeiro, o que foi um fator positivo para o crescimento das mudas. A tabela a seguir mostra que o solo possuía níveis moderados de fósforo e potássio, sugerindo que a adição de efluentes poderia melhorar a disponibilidade desses nutrientes. Isso é particularmente importante, considerando que o fósforo é um nutriente limitante em muitos solos tropicais.

Tabela 2. Resultado da análise da fertilidade do solo

Profundidade	M.O	Ca+Mg	Ca	Al	H+Al	pH	Na	K	P
cm	dag/dm ³	Cmol _c /kg							(mg/kg)
0-20	2,8	0,2	0,1	1,6	8,4	4,3	0,0	12,0	3,1

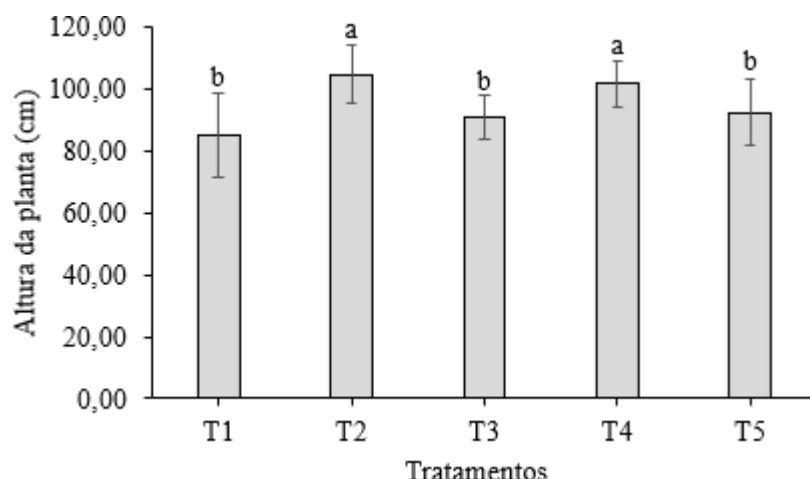
M.O: matéria orgânica.

Fonte: Laboratório Solo-Planta (UFOPA-CJUR).

Durante o período de 49 dias, várias medições foram realizadas para avaliar o desenvolvimento das mudas de maracujazeiro sob diferentes tratamentos. Essas medições incluíram altura das plantas, número de folhas e volume das raízes.

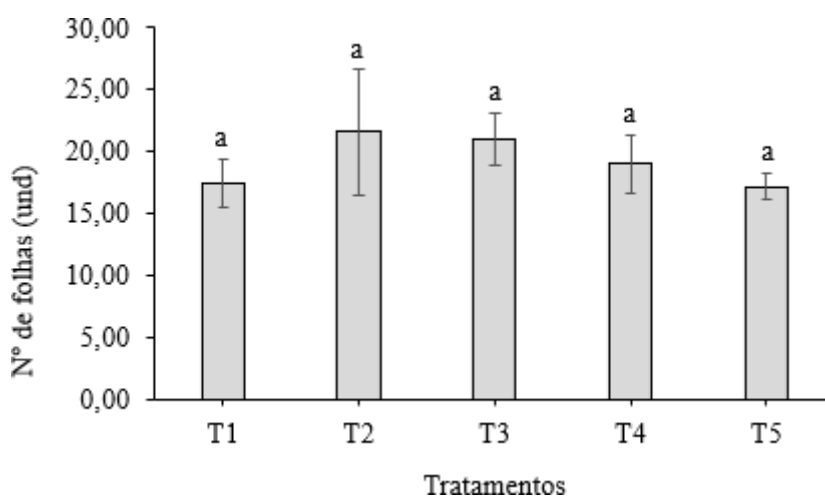


Figura 2: Altura das mudas de maracujá durante os 49 dias de execução do experimento, dados da 7ª mensuração e a barra de erro corresponde ao desvio padrão.



A Figura 2 mostra a altura das mudas de maracujazeiro medida semanalmente, os tratamentos T2 e T4 apresentaram as maiores médias de altura, indicando que essas doses de efluentes foram mais eficazes no crescimento vertical das plantas. A literatura indica que o fósforo é um macronutriente vital para o crescimento das raízes e, conseqüentemente, para a absorção de nutrientes para o crescimento da parte aérea, esses resultados confirmam esse fato, uma vez que os tratamentos que receberam doses adequadas de efluente potencialmente ricos em fósforo apresentaram melhor desenvolvimento.

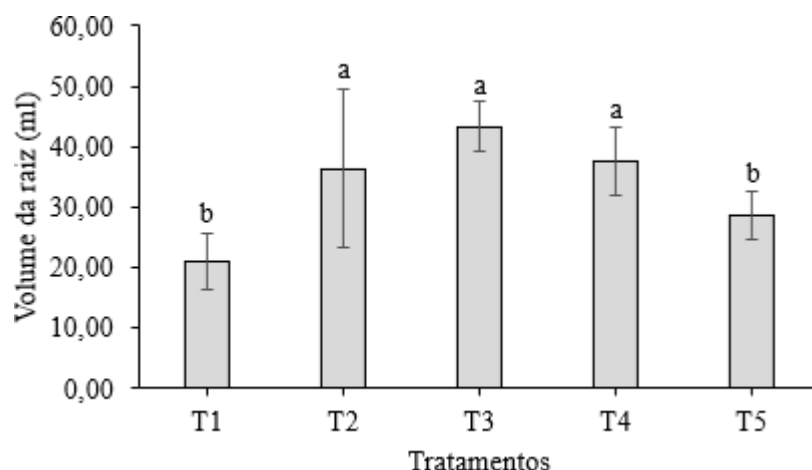
Figura 3. Valores referentes ao número de folhas por planta.



As plantas sob T2 e T4 tiveram um número maior de folhas, sugerindo que esses tratamentos possivelmente otimizaram a capacidade fotossintética das plantas. Carvalho et al., confirmam que a produção de folhas é diretamente influenciada pela disponibilidade de nutrientes, especialmente nitrogênio. Embora o estudo tenha focado no fósforo, o balanço adequado de todos os nutrientes no efluente parece ter proporcionado um ambiente favorável para a proliferação foliar.

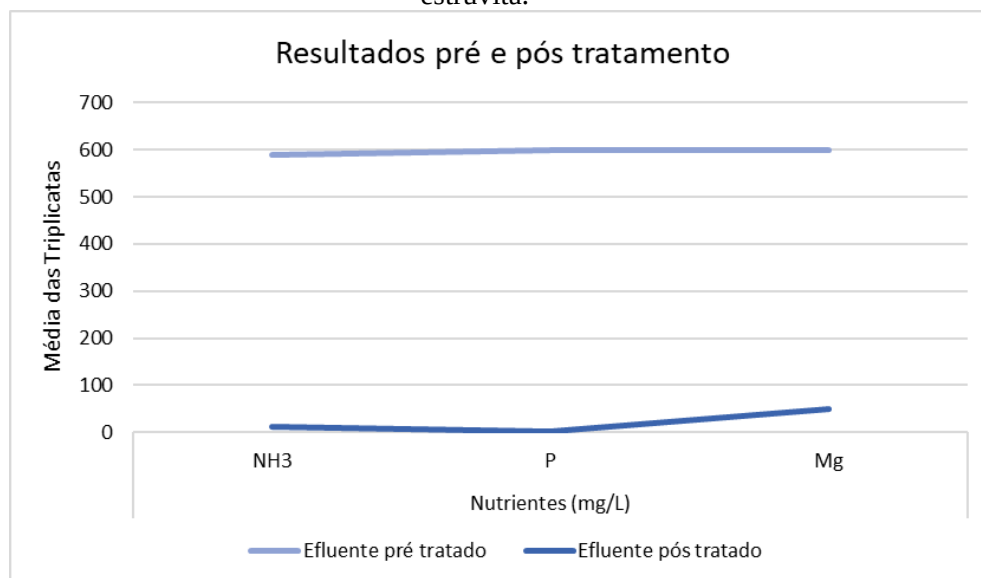


Figura 3. Dados referente ao volume das raízes.



O desenvolvimento radicular é relacionado a absorção de água e nutrientes. O fósforo é particularmente importante para o crescimento das raízes e a superioridade de T2 e T4 neste aspecto sugere que esses tratamentos forneceram fósforo em quantidades adequadas.

Gráfico 1. Valores referentes a média das triplicatas antes e após tratamento por precipitação de estruvita.



Gerhardt (2018) sustenta que o fósforo é um nutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, especialmente no que concerne ao desenvolvimento radicular e à absorção de água e nutrientes. O presente estudo corrobora estas afirmações, uma vez que a aplicação dos efluentes, presumivelmente ricos em fósforo, resultou em mudas com raízes mais desenvolvidas e saudáveis, o que é indicativo de uma planta com maior capacidade de nutrição e crescimento.



Os resultados obtidos estão alinhados com pesquisas anteriores que apontam para a eficácia do uso de efluentes agroindustriais tratados como fonte de nutrientes para a agricultura (Castro, 2014). Mendes (2022) salienta que o reuso de efluentes agroindustriais pode melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade das culturas, ao mesmo tempo em que minimiza o impacto ambiental do descarte inadequado desses resíduos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os níveis de fósforo total na água reciclada tenham sido considerados acima dos limites estabelecidos para descarte em corpos hídricos pela Resolução CONAMA Nº 357/05, a água reciclada possui características promissoras para ser usada em sistemas de fertirrigação, devido à presença significativa de P e NH₃. Essa pesquisa contribui para o entendimento da gestão sustentável de recursos hídricos e nutrientes, especialmente em regiões onde a água é escassa e o solo é pouco fértil, no caso da região usada neste estudo há uma má gestão dos recursos hídricos e o solo possui poucos nutrientes, o reúso de efluentes tratados pode aliviar a pressão sobre os recursos hídricos naturais e fornecer uma alternativa econômica e ambientalmente amigável para a agricultura.

Com base nas observações foi evidenciado que o tratamento T2, que envolveu a aplicação de uma dose específica de efluentes agroindustriais, apresentou os resultados mais favoráveis para o desenvolvimento das culturas. As mudas submetidas a este tratamento exibiram incrementos significativos em altura, número de folhas e volume das raízes, quando comparadas com os demais tratamentos. A superioridade do tratamento T2 no presente estudo pode ser atribuída à concentração adequada de nutrientes fornecidos pelos efluentes, particularmente o fósforo, que foi capaz de otimizar o crescimento vegetativo das plantas sem causar estresses ou toxicidades nutricionais. Este resultado é relevante para a prática agrícola sustentável, pois indica que o manejo correto dos efluentes agroindustriais pode ser uma estratégia para melhorar a produtividade agrícola, ao mesmo tempo em que contribui para a gestão ambiental e a economia circular dos recursos. A viabilidade do uso de efluentes agroindustriais como fertilizante é promissora, mas doses adequadas devem ser determinadas para maximizar a produtividade sem causar danos ambientais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Projeto Amazônia +10, a Fundação Amazônica de Amparo a Estudos e Pesquisa (FAPESPA), ao Grupo de Estudos em Saneamento, Estruvita e Sustentabilidade (SANES) pelo apoio e orientação, ao Programa de Pós Graduação em Recursos Naturais da Amazônia (PPGRNA) e a equipe do Laboratório de Química Aplicada pela contribuição com as análises da pesquisa.

5. REFERÊNCIAS E CITAÇÕES

ALEGRE, Ana Inês de Sousa Fontes. **Avaliação do potencial de recuperação de fósforo de efluentes líquidos através de precipitação de estruvite**. 2022. Dissertação de Mestrado.

BARBOZA, Thales Rodrigues; DE FREITAS, Rodrigo Randow; DA SILVA PORTO, Paulo Sérgio. Uma análise bibliométrica sobre a remoção/recuperação de amônia de águas residuais através da precipitação em estruvita. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e379996150-e379996150, 2020.

BRASIL. **Resolução nº 481, de 03 de outubro de 2017**. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências.



Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). p. 4, 2017. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=137380#:~:text=OUTUBRO%20DE%202017-.Estabelece%20crit%C3%A9rios%20e%20procedimentos%20para%20garantir%20o%20controle%20e%20a,org%C3%A2nicos%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias.> Acesso em 04 de agosto de 2024.

CASTRO, Samuel Rodrigues. **Precipitação de Estruvita: Recuperação de nitrogênio e fósforo utilizando fontes alternativas de reagentes**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho. Acesso em 25 jan. 2024.

DA SILVA, Vicente de PR et al. Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 100-105, 2013.

DO NASCIMENTO RODRIGUES, Letícia Mothé et al. Revisão de estudos sobre a recuperação de amônia via precipitação de estruvita. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 6, n. 9, p. 20-36, 2020.

GERHARDT, Rafael; REISDORFER, Gustavo; CARDOSO, Manuela Gomes. Remoção de nitrogênio e fósforo de efluente industrial através da precipitação de estruvita. **Tecno-Lógica, Santa Cruz do Sul**, v. 22, n. 1, p. 35-40, 2018.

JUNIOR, Fritz; DA CONCEIÇÃO, Denilton. **Recuperação de fósforo a partir de efluente industrial por meio de precipitação como sal de estruvita**. 2022.

MEIRA, R. C. S. **Otimização da síntese de estruvita e seus análogos visando a recuperação de fósforo, magnésio, nitrogênio e potássio de águas residuais**. 2020. 129 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

MENDES, Luísa Sofia Felício. **Recuperação de fósforo através da precipitação de estruvite para a produção de fertilizantes**. 2022. Dissertação de Mestrado.

NASCIMENTO, B. K. S.; MEIRA, R. C. S. ; RODRIGUES, C. C. S. ; LOPES, J. R. ; FIGUEIREDO, E. K. M. . Avaliação da Eficiência da remoção de amônia e Fósforo de Efluente Agroindustrial por Precipitação de Estruvita. **In: Anais do 32º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Belo Horizonte MG. Anais-32 CBESA, 2023.

PEREIRA, Laís Mazullo Mascarenhas. **Avaliação de parâmetros físico-químicos para recuperação de fósforo por precipitação de estruvita em esgoto sintético**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso.

PERES, Yuri Cubas. **Avaliação da influência do gradiente de velocidade e adição de sementeira em ensaios de precipitação de estruvita**. 2019.

SANTOS, Wilson Roberto Barreto dos et al. **Remoção de nitrogênio ou fósforo presente em efluentes agroindustriais pela precipitação de estruvita**. 2011.





**12º Simpósio
Internacional de
Qualidade
Ambiental**

**Data do Evento:
04, 05 e 06/11/2024**

**TEMA:
Desafios e soluções
ambientais na
adequação aos
critérios ESG**

SILVA, Natanael Charles da. **Abordagem da educação para a sustentabilidade em cursos de licenciatura em Biologia da região amazônica paraense: perspectivas teóricas e metodológicas.** 2024

Realização



PUCRS



abes-rs@abes-rs.org.br



(51) 999330700



www.abes-rs.org.br

