

INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE

Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação

Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente



Dissertação

**Recuperação de Nitrogênio e Fósforo de Efluentes Suinícolas Via Produção de Estruvita
com Utilização de Magnésio de Baixo Custo**

Gabriel Cristiano Walz

Araquari, 2022

Gabriel Cristiano Walz

Recuperação de Nitrogênio e Fósforo de Efluentes Suínícolas Via Produção de Estruvita com Utilização de Magnésio de Baixo Custo

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente do Instituto Federal Catarinense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área de concentração: Ciências Ambientais).

Orientador: Dr. Cleder Alexandre Somensi

Araquari, 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática do ICMC/USP, cedido ao IFC e
adaptado pela CTI - Araquari e pelas bibliotecas do Campus de Araquari e Concórdia.

W151r Walz, Gabriel Cristiano
Recuperação de Nitrogênio e Fósforo de Efluentes
Suinícolas Via Produção de Estruvita com Utilização de
Magnésio de Baixo Custo / Gabriel Cristiano Walz;
orientador Cleder Alexandre Somensi. -- Araquari,
2022.
41 p.

Dissertação (mestrado) - Instituto Federal
Catarinense, campus Araquari, , Araquari, 2022.

Inclui referências.

1. Magnésio de baixo custo. 2. Recuperação de
nutrientes. 3. Economia circular. 4. Estruvita. I.
Somensi, Cleder Alexandre. II. Instituto Federal
Catarinense. . III. Título.

Gabriel Cristiano Walz

Recuperação de Nitrogênio e Fósforo de Efluentes Suínícolas Via Produção de Estruvita com Utilização de Magnésio de Baixo Custo

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Ambiente, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Instituto Federal Catarinense.

Data da Defesa: 19/10/2022

Banca examinadora:

Prof. Dr. Cleder Alexandre Somensi (Orientador)

Doutor em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI

Instituição de vínculo: Instituto Federal Catarinense – Campus Araquari

Profa. Dra. Sandra Aparecida dos Santos

Doutora em Educação em Ciências: Química da Vida e Saúde pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituição de vínculo: Tecer Ambiental LTDA / Centro Universitário para o

Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí - UNIDAVI / Universidade Federal do Paraná - UFPR

Profa. Dra. Suellen Cadorin Fernandes

Doutora em Química pela Universidade Federal de Santa Catarina

Instituição de vínculo: Instituto Federal Catarinense – Campus Araquari



Emitido em 19/10/2022

DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS - CAMPUS ARAQUARI Nº 22/2022 - CCPGTA (11.01.02.31)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 18/02/2023 09:46)

CLEDER ALEXANDRE SOMENSI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DG/ARA (11.01.02.02)
Matrícula: ###368#2

Visualize o documento original em <https://sig.ifc.edu.br/documentos/> informando seu número: **22**, ano: **2022**, tipo: **DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS - CAMPUS ARAQUARI**, data de emissão: **17/02/2023** e o código de verificação: **b311311bbf**

Dedico este trabalho à minha família, amigos e aos meus professores.

Agradecimentos

À minha família, por sempre me apoiar e incentivar. Principalmente a minha mãe Tania e meu pai Geraldo por toda a dedicação e esforços para que eu tivesse condições de seguir com os estudos.

Aos meus amigos, sempre positivos, animados e amáveis, dispostos a ajudar e aconselhar, parceiros em momentos difíceis e sábios nos conselhos.

Aos meus professores, que sempre lutaram por uma educação de qualidade, me permitindo discernimento e senso crítico, além, é claro, de sempre me motivar e desafiar.

Agradeço àqueles que me ajudaram nessa jornada com ideias, propostas, possibilidades e percepções.

Agradeço, por fim, ao meu orientador, Professor Cleder, pelos desafios, risadas, parcerias e solicitude.

Resumo

WALZ, Gabriel Cristiano. **Recuperação de Nitrogênio e Fósforo de Efluentes Suinícolas Via Produção de Estruvita com Utilização de Magnésio de Baixo Custo**. 2022. "41". Dissertação (Mestrado em Ciências) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Ambiente, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Instituto Federal Catarinense, Araquari, 2022.

A necessidade global de alimentos demanda por produção sistemática de fertilizantes, tendo o Brasil papel fundamental neste cenário, que pode ser de liderança se conduzido de forma ambientalmente amigável e economicamente sustentável. Tanto a produção de proteína animal, como é o caso da criação intensiva de suínos, como a síntese de fertilizantes nitrogenados (a partir do petróleo) e fosforados (a partir de minérios naturais), possuem elevado potencial poluidor, cada qual com suas características. Nesta guisa, o objetivo deste trabalho foi recuperar os nutrientes nitrogênio (N) e fósforo (P) a partir do efluente suinícola *in natura*, via produção de um potencial fertilizante de liberação lenta, o mineral estruvita (fosfato de magnésio e amônio ou $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), utilizando como fonte de magnésio (Mg) um resíduo industrial local, de baixo custo. Os resultados da condição ótima de tratamento (pH 9,0 e concentração de solução de resíduo de Mg $13,5 \text{ mg.L}^{-1}$) mostraram uma redução de 23,4% na concentração de fosfatos e 97,8% na redução de amônia no efluente de suínos, assim como a formação do mineral estruvita, mostrando a potencialidade da técnica partindo-se apenas de resíduos, sem a necessidade de reagentes de elevado grau de pureza e, conseqüentemente, custos. A limitação de produção da estruvita devido aos custos do Mg pode ser superada pela utilização deste resíduo amplamente disponível, necessitando de testes adicionais que permitam a quantificação e melhor qualificação do mineral.

Palavras-chave: magnésio de baixo custo; recuperação de nutrientes; economia circular; estruvita; fósforo; nitrogênio.

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável alcançados (ODSs):

- Fome zero e agricultura sustentável;
- Água potável e saneamento;
- Consumo e produção sustentáveis.

Abstract

WALZ, Gabriel Cristiano. **Recovery of Nitrogen and Phosphorus from Swine Effluents By Struvite Production Using Low Cost Magnesium**. 2022. "41". Dissertation (Master degree in Science) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Ambiente, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Instituto Federal Catarinense, Araquari, 2022.

The global need for food demands systematic production of fertilizers, with Brazil having an important role in this scenario, which can be a leader if conducted in an environmentally friendly and economically sustainable way. Both the production of animal protein, as is the case of intensive pig farming, as well as the synthesis of nitrogen fertilizers (from oil) and phosphorus (from natural ores), have high polluting potential, each with its own characteristics. In this way, the objective of this work was to recover the nutrients nitrogen (N) and phosphorus (P) from *in natura* swine effluent, for the production of a potential fertilizer of slow release, the mineral struvite (magnesium ammonium phosphate or $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), using a low-cost local industrial waste as a source of magnesium (Mg). The results of the optimal treatment condition (pH 9.0 and Mg residue solution concentration $13.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) showed a 23.4% reduction in phosphate concentration and 97.8% in the reduction of ammonia in the swine effluent, as well as the formation of the struvite mineral, showing the potential of the technique starting only from residues without the need for reagents of high purity and consequently costs. The limitation of struvite production due to Mg costs can be overcome by using this widely available residue, requiring additional tests to allow quantification and better qualification of the mineral.

Keywords: Low Cost Magnesium; nutrient recovery; circular economy; Struvite; phosphorus; nitrogen.

Sustainable Development Goals achieved:

- Zero Hunger;
- Clean Water and Sanitation;
- Responsible Consumption and Production.

Lista de Figuras

Figura 1: Percentual de Remoção de Amônia nos Diferentes Tratamentos	25
Figura 2: Cristais de Estruvita por Microscopia Óptica	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características do resíduo industrial de magnésio	24
Tabela 2: Concentração remanescente pós-tratamento	27
Tabela 3: Concentração dos íons antes e após a realização do tratamento	28

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E ESTADO DA ARTE	10
2	OBJETIVOS	18
2.1	Geral	18
2.2	Específicos	18
3	RECUPERAÇÃO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO DE EFLUENTES SUINÍCOLAS VIA PRODUÇÃO DE ESTRUVITA COM UTILIZAÇÃO DE MAGNÉSIO DE BAIXO CUSTO	19
3.1	Introdução	20
3.2	Materiais e Métodos	21
3.2.1	Fonte de Mg alternativa e Preparação das Soluções	23
3.2.2	Análise Estatística	23
3.3	Resultados e Discussão	24
3.3.1	Caracterização do Resíduo Industrial de Mg	24
3.3.2	Remoção de Amônia e Condição Ótima de Tratamento	24
3.3.3	Tratamento do Efluente Suinícola na Condição Ótima	27
3.4	Conclusões	31
4	Considerações Finais	32
5	REFERÊNCIAS	34

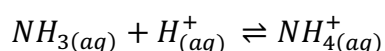
1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E ESTADO DA ARTE

A demanda global por alimentos tem preocupado a comunidade científica e diferentes lideranças políticas no que se refere à garantia de oferta / segurança alimentar e à produção ambientalmente sustentável, principalmente devido ao aumento da população mundial. Inclui-se nesta demanda o incremento da dieta de países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, levando à elevação no uso de fertilizantes para suprir as necessidades da alimentação humana (MORITA; AVILA; AIDAR, 2019).

Bilhões de pessoas foram alimentadas com a ajuda da utilização de fertilizantes fosfatados. Reciclar o fósforo é essencial, uma vez que não há substituição para este nutriente na produção de alimentos, e que se trata de um nutriente finito (ciclo biogeoquímico lento) (CORDELL; WHITE, 2014).

Sobre a demanda de fertilizantes, estima-se que as reservas de fósforo não devem ultrapassar 400 anos. Quanto ao nitrogênio, sabe-se que está presente na atmosfera, entretanto, a transformação deste em fertilizantes tem grandes impactos ambientais e depende de grandes quantidades de energia; ainda assim, trata-se de um processo de pouca eficiência (MORITA; AVILA; AIDAR, 2019).

Considerando que o nitrogênio se encontra presente nos efluentes em altas concentrações, um simples tratamento como digestão anaeróbia pode não atender às demandas para a diminuição dos teores do íon amônio (NH_4^+). Dessa forma, o lançamento de efluentes pode causar graves problemas como a eutrofização (RODRIGUES; BAZONI; COTTA, 2021). O nitrogênio amoniacal corresponde à soma das espécies amônio e amônia (NH_3), que se encontram em equilíbrio em meio aquoso, conforme a equação que segue (PEREIRA; MERCANTE, 2005):



A proporção amônia/amônio aumenta conforme há um aumento da temperatura e pH (WANG *et al.*, 2020), o que aumenta a toxicidade do meio, afetando

diretamente organismos aquáticos, diminuindo o oxigênio disponível e podendo permear através das membranas celulares e se acumular em seus tecidos gordurosos (PEREIRA; MERCANTE, 2005; RODRIGUES; BAZONI; COTTA, 2021; WANG *et al.*, 2020).

Uma das formas para recuperar a amônia se dá através de uma membrana hidrofóbica permeável a gás — que é eficiente em capturar contaminantes voláteis —, em que um dos lados da membrana passa o efluente com pH básico adequado, no outro lado da membrana passa uma solução de ácido sulfúrico. Como a membrana é permeável apenas ao gás, a amônia gasosa é recuperada e convertida a sulfato de amônio. Entretanto, os custos com reagentes são significativos (YAN *et al.*, 2020).

A preocupação com o meio ambiente e com os efluentes provenientes da atividade humana não é recente. Porém, o tratamento dos efluentes está se tornando, cada vez mais, um desafio, visto o natural enrijecimento das normas e restrições para a deposição de tais materiais no ambiente devido à crescente síntese de substâncias para diferentes fins (complexos metálicos, fármacos e corantes, por exemplo). Variados são os métodos para tratar os diversos tipos de efluentes, contando com eficiências e viabilidades econômicas para cada método (CASTRO *et al.*, 2015).

Estudos apontam que os contaminantes mais comuns encontrados nos recursos hídricos dos Estados Unidos e da Europa são nitrogênio (N) e fósforo (P). Estes contaminantes provêm do esgoto doméstico e da atividade industrial, entre outras fontes, como por exemplo a produção de alimentos (ULUDAG-DEMIRER; DEMIRER; CHEN, 2005).

No cenário de produção de alimentos, o Brasil se destaca. Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2022), o estado de Santa Catarina foi o maior produtor de carne suína do Brasil em estudo de 2021, produzindo o correspondente a 31,6% da produção brasileira. Trata-se de uma atividade de grande importância econômica, embora possua impactos ambientais devido ao seu potencial poluidor. Os efluentes suínos são caracterizados por grandes concentrações de sólidos suspensos, nutrientes, matéria orgânica e patógenos (PINAFFI; SCANDELA; SANTOS, 2020).

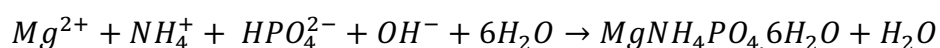
Admitindo-se a importância da suinocultura para a alimentação e economia, associado ao impacto ambiental, devem ser tomadas medidas a mitigar os danos e possibilitar que os nutrientes sejam recuperados e reciclados, agregando valor aos resíduos.

Sobre a criação de suínos, uma das técnicas empregadas para o tratamento dos efluentes é a digestão anaeróbia, que apesar de reduzir significativamente a carga orgânica, não permite que o efluente seja lançado diretamente nos corpos hídricos, visto que os teores de N, P e K (potássio) ainda são elevados.

A preocupação com a recuperação de nutrientes como fósforo e nitrogênio surgiu devido ao impacto que podem ocasionar ao meio ambiente, além do fato de o fósforo ser reconhecido como um elemento em possível escassez. Tal preocupação é estratégica para garantir a qualidade dos solos, água e da vida futuros (CARMONA, 2017; PANTANO *et al.*, 2016).

Uma das possibilidades para remover N e P dos efluentes e recuperá-los é a cristalização destes na forma de estruvita (fosfato de magnésio e amônio ou $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$). Esta técnica possibilita também a redução da quantidade de lodo que as estações de tratamento produzem (ULUDAG-DEMIRER; DEMIRER; CHEN, 2005).

A estruvita é um sólido cristalino e seu processo de formação ocorre em duas etapas: nucleação e crescimento cristalino. Contudo, não se tem um consenso sobre o mecanismo pelo qual a estruvita é formada. Pode-se definir, em termos gerais, que a reação de formação segue a seguinte equação:



A estruvita é formada quando se tem quantidade equimolares de Mg^{2+} , NH_4^+ e PO_4^{3-} em uma dada faixa de pH. Diferentes faixas de pH e temperatura influenciam diretamente no processo (SENGUPTA; NAWAZ; BEAUDRY, 2015).

Há, entretanto, alguns íons que podem interferir na produção da estruvita. Está estabelecido que a presença de íons carbonato (CO_3^{2-}) e cálcio (Ca^{2+}) afetam

negativamente a produção da estruvita (LE CORRE *et al.*, 2005; WU *et al.*, 2022). O íon cálcio, por exemplo pode ocupar o sítio de ligação do amônio no cristal de estruvita, dessa forma inibindo o crescimento cristalino, além da possibilidade de diminuir a disponibilidade do íon fosfato, uma vez que pode reagir e formar o precipitado de fosfato de cálcio (comumente na forma de hidroxiapatita $Ca_5(PO_4)_3OH$) (WU *et al.*, 2022). A proporção entre magnésio e cálcio também é relevante, em maiores proporções o íon cálcio compete com o íon magnésio (Mg^{2+}) (MORITA; AVILA; AIDAR, 2019). O crescimento dos cristais de estruvita é interrompido em proporção de 1 Ca:Mg e a dissolução de estruvita eventualmente pode ser observada em 2 Ca:Mg (SCHOTT *et al.*, 2022). O íon carbonato também reage com o íon magnésio, diminuindo sua disponibilidade e afetando o rendimento da precipitação (HU *et al.*, 2020).

Outro íon interferente é o sulfato (SO_4^{2-}). Em estudo utilizando reagentes puros, Kabadaşli, Atalay & Tünay (2017) identificaram que em concentrações superiores a 21 mmol/L, o íon sulfato, aparentemente, compete com o íon fosfato, interferindo de forma negativa no tempo de indução. Tempo de indução é entendido como o período entre a supersaturação da solução e o surgimento dos primeiros núcleos, para posterior crescimento dos cristais (KABDAŞLI; ATALAY; TÜNAY, 2017).

A proporção entre Mg:N:P é um fator crítico para a precipitação da estruvita. Para obter melhores rendimentos, muitas vezes se faz necessário enriquecer o efluente para adequar a proporção (HUANG *et al.*, 2014; KY *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2018)

No efluente do biodigestor anaeróbio é necessária minimamente a adição de magnésio para precipitação da estruvita, em se tratando de um processo com a mínima interferência para o menor custo final. A fonte para o magnésio pode ser diversificada, desde sais puros como o cloreto de magnésio ($MgCl_2$), até fontes de baixo custo relativo, como o óxido de magnésio (MgO). Vale ressaltar que as fontes de baixo custo podem diminuir de forma significativa o valor da produção da estruvita (HUANG *et al.*, 2014).

A produção de estruvita em larga escala ainda tem seus desafios, como visto acima, uma vez que o custo dos reagentes é considerável, especialmente o magnésio e a base ou ácido para a correção do pH (LI *et al.*, 2022). Muitas vezes, as fontes de magnésio de baixo custo podem ser uma alternativa; entretanto, novos custos surgem. Óxido de magnésio, por exemplo, não é muito solúvel em ambiente alcalino, como aquele necessário para a precipitação da estruvita, implicando em pré-tratamentos na fonte de magnésio como dissolução ácida (YE *et al.*, 2021) e/ou a pirólise (LI *et al.*, 2021).

Alternativamente aos pré-tratamentos, um excesso de MgO promove maior produção de estruvita (YE *et al.*, 2021), este excesso de Mg^{2+} não afeta pós-tratamentos biológicos (HUANG *et al.*, 2014). A magnesita ($MgCO_3$), principal fonte de óxido de magnésio, foi testada por um método eletroquímico, resultando em redução de até 60% do custo da produção de estruvita (LI *et al.*, 2021). Ainda no raciocínio sobre o custo do magnésio, fontes como *bittern*, cinzas de madeira e óxido de magnésio impuro, podem ser utilizados (ASTALS *et al.*, 2021). Sobre as cinzas de madeira, algumas considerações devem ser tomadas, principalmente em relação à pureza da estruvita precipitada (SAKTHIVEL; TILLEY; UDERT, 2012).

Outras fontes potenciais de Mg são resíduos de empresas de mineração e mais recentemente a utilização da própria água do mar (BRADFORD-HARTKE; RAZMJOU; GREGORY, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2022).

A síntese da estruvita por meio de fontes de magnésio de baixo custo, requerem, em muitas vezes, menor correção do pH para a precipitação. Fontes como MgO e $Mg(OH)_2$ elevam o pH, entretanto, para a efetiva precipitação, excessos de magnésio são aconselhados (DEGRYSE *et al.*, 2017).

Em estudo relacionado à aplicação da estruvita como fertilizante, Arcas-Pilz *et al.* (2021) identificaram que seu uso em cultivos hidropônicos se iguala e até aumenta o rendimento em comparação ao fertilizante mineral (ARCAS-PILZ *et al.*, 2021). Bons resultados também foram observados em cultivo de arroz irrigado, nos quais a estruvita se mostrou eficiente como fonte de fósforo. Por outro lado, como fonte de nitrogênio

para o cultivo em questão, a estruvita pode reduzir ou manter a necessidade de fertilizante, mas tem o potencial de melhorar o rendimento para o cultivo (OMIDIRE *et al.*, 2022).

Para melhorar a eficiência do cultivo, a relação planta-rizosfera-solo precisa ser compreendida, uma vez que o fertilizante pode mudar a dinâmica do N, alterando a funcionalidade e as associações das bactérias presentes no meio. Estas diferenças puderam ser percebidas por Robles-Aguilar *et al.* (2020), ao compararem o cultivo de tremoço com fertilizante orgânico e estruvita como fontes de N com o cultivo de tomate. Apesar do crescimento da raiz ter sido maior com o fertilizante orgânico em comparação à estruvita, no cultivo do tremoço não foram observadas diferenças significativas na biomassa. Por outro lado, o crescimento das plantas fertilizadas foi superior ao das plantas não fertilizadas, indicando o potencial da estruvita como fertilizante (ROBLES-AGUILAR *et al.*, 2020).

Por se tratar de um fertilizante de dissolução lenta (RODRIGUES; BAZONI; COTTA, 2021), várias podem ser as aplicações da estruvita. Já foram realizados testes com cultivos como: forrageira, milho, alface, repolho, beterraba e plantas medicinais, ensaios estes que trouxeram bons resultados (MEMELLI *et al.*, 2018). Ressalta-se apenas que cada tipo de cultura deve ser investigada em relação à planta-rizosfera-solo (ROBLES-AGUILAR *et al.*, 2020).

Os fertilizantes a base de estruvita interagem com o solo de diferentes formas, a depender da fonte da estruvita e do próprio solo (RECH *et al.*, 2019). Em solos mais ácidos, a dissolução da estruvita e a consequente disponibilidade dos nutrientes é maior. A taxa de dissolução pode ser alterada caso a estruvita seja disponibilizada na forma de *pellets* ou em pó. No primeiro dos casos, a dissolução é mais lenta. Na forma em pó, a estruvita — quando homogeneizada com o solo — torna disponível os nutrientes já no primeiro dia (DEGRYSE *et al.*, 2017).

Para a estruvita em pó, a dissolução no solo é semelhante tanto para sais de magnésio quanto para bases como MgO e Mg(OH)₂. Para a estruvita na forma de *pellets*,

maiores concentrações da base diminuem a taxa de dissolução no solo (DEGRYSE *et al.*, 2017).

A possibilidade de alterar a taxa de dissolução pode evitar a hipersaturação dos nutrientes, isso implicando em menos aplicações do fertilizante nas plantações e reduzindo a eutrofização dos corpos hídricos. Além disso, os macronutrientes essenciais Mg, N e P são introduzidos simultaneamente (MORITA; AVILA; AIDAR, 2019).

Em estudo de Yetilmezsoy *et al.* (2017) sobre a implantação de uma estação de recuperação de nutrientes em escala de 500 m³/dia, definindo o preço de 560 € por tonelada de estruvita, o lucro aproximado seria de 445,62 €/dia. Tal lucro seria suficiente para pagar os investimentos da estação em aproximadamente seis anos (YETILMEZSOY *et al.*, 2017). Em se tratando de valores, Maaß, Grundmann & Polach (2014) sugeriram que quando o custo por quilograma da estruvita é de 1 €, a redução dos custos com fertilização, dependendo da cultura, qualidade do solo e quantidade de fertilizante aplicada pode estar entre 1 €/ha e 21 €/ha. Associado à estruvita, a redução de custos com fertilizantes de N esteve entre 7-16% (MAAß; GRUNDMANN; POLACH, 2014).

Neste sentido, a recuperação de nutrientes vai na contramão do atual modelo econômico, que é baseado no modelo linear, em que os recursos utilizados na produção são descartados após sua utilização. Com o crescimento econômico e o alto consumo da população, esse modelo de produção causou e causa grandes problemas ambientais, como a geração de resíduos que são descartados e a escassez de recursos naturais. Como alternativa a esse modelo linear de produção, foi concebido um modelo mais sustentável: a economia circular, que visa um ciclo fechado dos recursos aplicados, no qual, ao final da vida dos produtos, eles possam ser reaproveitados com a reutilização ou reciclagem, diminuindo os problemas ambientais gerados pelo modelo linear e gerando benefícios econômicos e sociais (VIER *et al.*, 2021).

A economia circular surge como um novo padrão restaurador e regenerativo de produção, com o objetivo de manter os recursos naturais pelo maior tempo possível em utilização, com a reutilização de resíduos, reduzindo drasticamente a geração deles. A

produção circular engloba todo o ciclo de vida de um produto e seus princípios são inspirados nos ciclos biológicos, otimizando o uso de recursos naturais em um sistema ao longo do tempo (MOTTA, 2022).

Portanto, a recuperação dos nutrientes dos dejetos suínos pode ser viabilizada pela precipitação do mineral estruvita, reduzindo os teores de N e P do efluente e ainda possibilitando a produção de um fertilizante de valor agronômico elevado.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Recuperar os nutrientes nitrogênio e fósforo via precipitação do mineral estruvita utilizando fonte alternativa de baixo custo de magnésio e contribuir para o tratamento terciário dos efluentes da suinocultura.

2.2 Específicos

- Caracterizar o resíduo de Mg de fonte alternativa, de baixo custo;
- Viabilizar a produção de estruvita a partir do efluente in natura, via adição de Mg;
- Avaliar a interação entre a concentração do resíduo sólido rico em Mg (RSMg) e o pH durante os ensaios, tendo como variável resposta a remoção de nitrogênio amoniacal;
- Realizar os testes de produção de estruvita na melhor condição de remoção do nitrogênio amoniacal, avaliando a formação de cristais e a remoção de fosfato;
- Avaliar as concentrações de Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , CO_3^{2-} e SO_4^{2-} antes e depois dos testes de precipitação de estruvita, assim como sua interferência no processo de formação dos cristais.

3 RECUPERAÇÃO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO DE EFLUENTES SUINÍCOLAS VIA PRODUÇÃO DE ESTRUVITA COM UTILIZAÇÃO DE MAGNÉSIO DE BAIXO CUSTO

Gabriel Cristiano Walz¹

Cleder Alexandre Somensi²

¹ Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente. Instituto Federal Catarinense.

² Professor orientador do Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente. Instituto Federal Catarinense.

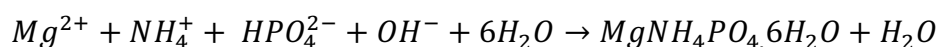
3.1 Introdução

O ciclo biogeoquímico do fósforo não é suficiente para permitir a completa recuperação deste nutriente devido principalmente à sua lixiviação para o fundo dos oceanos, assim como a poluição relacionada à produção de fertilizantes nitrogenados a partir do petróleo. Este contexto resulta em inúmeros trabalhos voltados a tecnologias e formas de recuperação destes elementos para se evitar uma maior degradação ambiental.

Tais estudos envolvem lixiviados de aterros sanitários, águas residuárias industriais, avícolas e de suínos, entre outras. Em todos os casos, tais efluentes que contém concentrações significativas de fósforo, se não tratados — além do potencial poluidor — estão contribuindo com a exploração das rochas fosfatadas, que são depósitos finitos do mineral (CASTRO, 2014).

Associado ao fósforo, o nitrogênio também tem sido removido e recuperado dos efluentes com tecnologias como precipitação química, biorremediação e separação física. Tecnologias biológicas podem ter desvantagem sobre processos físico-químicos em relação ao tempo, área e período de adaptação dos microrganismos. As tecnologias físico-químicas, por outro lado, têm sido estudadas e sugeridas para esse fim. São exemplos de tecnologias físico-químicas a precipitação de estruvita, eletrólise, osmose reversa, *air stripping* e radiação com micro-ondas (KY *et al.*, 2022)

A precipitação da estruvita é uma tecnologia promissora, bastante eficaz na remoção de nitrogênio e fósforo, gerando um sal que pode ser utilizado como fertilizante de dissolução lenta. Para a precipitação, quantidades estequiométricas iguais dos íons de fósforo, magnésio e amônio são requeridas, como na equação que segue:



Não há, entretanto, um consenso na literatura sobre os mecanismos pelos quais a estruvita precipita, onde são discutidas as relações entre a nucleação e o crescimento dos cristais. De todo modo, a reação é específica e consegue produzir cristais de grande pureza mesmo para diferentes resíduos a serem tratados (WANG *et al.*, 2019)

Para que a técnica seja viável economicamente, mostra-se necessária a implementação de alternativas para a obtenção de íons de magnésio e alcalinidade, uma vez que ambos são os principais responsáveis por elevar os custos do processo (CASTRO, 2014). Neste sentido, no presente trabalho buscou-se verificar a viabilidade de precipitação da estruvita a partir de efluente suíno com a utilização de um resíduo sólido industrial, rico em magnésio (RSMg), como alternativa de baixo custo.

3.2 Materiais e Métodos

Os tratamentos foram realizados em reatores de vidro de 200 mL, sendo cada tratamento composto de 30 mL de efluente suíno *in natura* (coletado no final da lagoa de tratamento secundário, facultativa, do Setor de Suinocultura do IFC Araquari (este setor abrange todas as fases de desenvolvimento dos suínos, incluindo nascimento e engorda), e 30 mL de solução de resíduo rico em Mg (com concentração definida), com duração de 20 minutos cada, sob agitação constante. Amônia foi mensurada no início e ao final dos tratamentos, em todas as fases. Os demais analitos também foram analisados ao início e ao final do tratamento, mas somente no tratamento ótimo. A estruvita foi qualificada apenas ao final do tratamento ótimo. Todos os tratamentos foram realizados em triplicata. Em todos as réplicas foi realizado um tratamento-controle, que consistia nas mesmas condições do tratamento-alvo, exceto pela ausência da solução de resíduo de Mg. Para encontrar a condição ótima de tratamento, inicialmente verificou-se a interação entre a concentração do resíduo industrial rico em Mg e o pH, sem interferir nas concentrações *in natura* de nitrogênio amoniacal e fosfato do efluente suíno.

Foram realizados quatro tratamentos (fatorial 2^2), partindo-se dos pHs 4 e 9 e das concentrações de 4,5 e 13,5 mg.L⁻¹ do resíduo industrial rico em Mg, observando-se como resposta a remoção de nitrogênio amoniacal (T1 = pH 4 e RSMg 4,5 mg.L⁻¹; T2 = pH 9 e RSMg 4,5 mg.L⁻¹; T3 = pH 4 e RSMg 13,5 mg.L⁻¹; T4 = pH 9 RSMg 13,5 mg.L⁻¹). Para a melhor condição de tratamento, os testes foram repetidos (iguais aos testes iniciais, mas agora com volume total de 300 mL), observando-se a formação de cristais de estruvita e a remoção de fosfatos, assim como as concentrações de Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, CO₃²⁻ e SO₄²⁻, que também atuam como interferentes no processo de produção (nucleação, crescimento cristalino e/ou precipitação) da estruvita. A formação dos cristais foi analisada qualitativamente via microscopia óptica, com ampliação de 400 vezes, os quais foram coletados após centrifugação de 10 mL de amostra a 1500 rpm e durante 10 minutos (SBPC/ML, 2017). Cálcio, carbonato e magnésio foram analisados por titulação, já o potássio por absorção atômica de chama, sulfato foi determinado pelo método turbidimétrico e segundo metodologias padrão (APHA, 1995). A quantificação de nitrogênio amoniacal foi realizada pelo método Nessler (APHA, 1995) no qual, em resumo, 200 µL do reagente de Nessler são adicionados a 10 mL da amostra, permanecendo em repouso por 10 minutos, posteriormente centrifugados em 3600 rpm por 5 minutos. Trata-se de método colorimétrico, em que o reagente de Nessler reage com a amônia presente na amostra, colorindo-a em tons de laranja, os quais são lidos em espectrofotômetro UV-VIS a 425 nm. Para as curvas de calibração e testes iniciais, foram utilizadas soluções estoque de reagentes de padrão analítico de cloreto de amônio (NH₄Cl) padronizada, cloreto de magnésio (MgCl₂) e fosfato de sódio dibásico (Na₂HPO₄). Fosfatos foram mensurados pelo método molibdofosfórico e redução com ácido ascórbico (GRASSHOFF; EHRHARDT; KREMLING, 1983), no qual, em resumo, 5 mL de amostra e 0,75 mL de uma mistura reagentes (molibdato de amônio, antimônio tartarato de potássio, ácido ascórbico e ácido sulfúrico) são adicionados em frascos de ensaio, mantidos em repouso por 10 minutos e lidos em espectrofotômetro UV-VIS a

885 nm. A curva de calibração foi elaborada por meio de soluções padrão de dihidrogenofosfato de potássio anidro.

3.2.1 Fonte de Mg alternativa e Preparação das Soluções

O Mg utilizado nos tratamentos é proveniente de um resíduo industrial da extração de magnésio da água marinha, o qual atualmente tem seu descarte realizado em aterros industriais. Os principais produtos industriais do fabricante destinam-se aos setores de alimentos e fármacos, sendo que o resíduo está na forma de pó fino e amorfo, na cor branca, muitas vezes compactado em pequenas pedras. Este resíduo sólido foi caracterizado por complexometria com EDTA para os íons de magnésio e cálcio (APHA, 1995). Para o íon sulfato foi utilizado o método turbidimétrico com precipitação de BaCl_2 (TABATABAI, 1974) e para o íon cloreto o método utilizado foi o argentométrico (SKOOG; WEST; HOLLER, 2009). Para que o resíduo pudesse ser utilizado durante os tratamentos, ele era pulverizado com auxílio de almofariz e pistilo, seguindo de aferição das massas e solubilização. No caso da solução de $13,5 \text{ mg.L}^{-1}$, foi necessária breve acidificação para completa dissolução do resíduo.

3.2.2 Análise Estatística

Os dados de concentração de amônia foram analisados por meio do procedimento MIXED em um modelo que incluiu pH e concentração de resíduo rico em Mg (parâmetros) como efeito fixo, onde então as interações entre os parâmetros foram testadas. As médias foram comparadas pelo Teste de Tukey. Usando o critério de informação de Akaike, a estrutura diagonal foi considerada como o melhor modelo para a estrutura de covariância residual. As análises foram realizadas no programa SAS (Statistical Analysis System Inst. Inc., Cary, NC, versão 9,3) e diferenças estatísticas significativas foram consideradas quando $P < 0,05$.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Caracterização do Resíduo Industrial de Mg

Os principais constituintes do resíduo industrial utilizado como fonte alternativa de Mg de baixo custo seguem o disposto na Tabela 1.

Tabela 1: Características do resíduo industrial de magnésio

Determinação	Especificação
Aspecto visual	Pó branco, fino e amorfo
Hidróxido de magnésio	90%
Cloretos	2,5%
Sulfatos	2,0%
Óxido de Cálcio	2,5%
Outros	3,0%

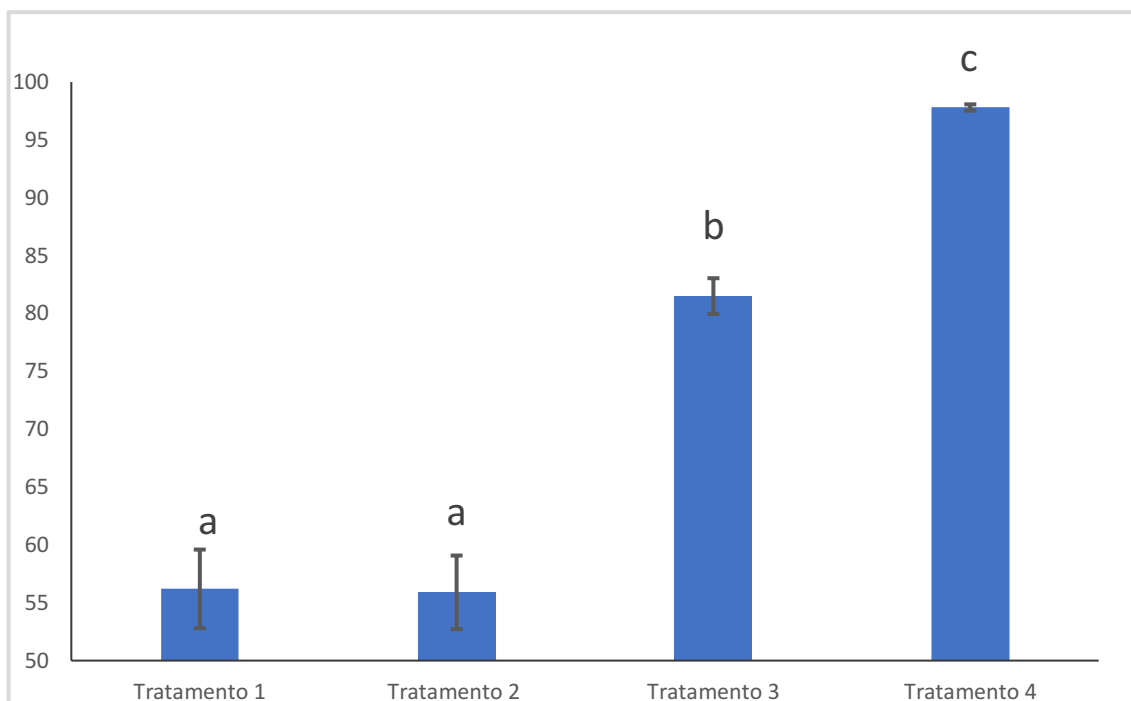
Diferente de sais puros de magnésio, o hidróxido de magnésio possui uma solubilidade lenta e em menor quantidade em água ($K_{ps} = 1,1 \times 10^{-11}$)³, inclusive dependente do pH (AMARAL *et al.*, 2007). A velocidade da reação, devido à solubilidade, é menor, e muitas vezes excessos de hidróxido de magnésio se fazem necessários (CASTRO, 2014; DEGRYSE *et al.*, 2017). Destaca-se também a presença de CaO no resíduo industrial, sendo que o Ca^{2+} compete com o Mg^{2+} , ou seja, quanto maior a relação entre Ca^{2+} e Mg^{2+} em pHs alcalinos, haverá tendência a menor produção de estruvita.

3.3.2 Remoção de Amônia e Condição Ótima de Tratamento

³ (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018)

A Figura 1 apresenta a remoção de amônia (%) nos diferentes tratamentos do efluente suinícola, resultado que levou à condição ótima de tratamento.

Figura 1: Percentual de Remoção de Amônia nos Diferentes Tratamentos



Considerando o exposto, nota-se que o tratamento 1 obteve uma redução de 56,2% da concentração de nitrogênio, enquanto o tratamento 2 obteve 55,9%, ambos sem diferença significativa. Entre estes tratamentos, a diferença foi apenas do parâmetro pH, ou seja, ficou evidente que a concentração de RSMg foi mais relevante na remoção de amônia que o pH. Entre os tratamentos 3 e 4, ambos com limite superior em termos da quantidade de magnésio disponível para a reação, diferindo apenas pelo parâmetro de pH, a redução da concentração de nitrogênio no tratamento 3 foi de 81,5% e o tratamento 4 reduziu 97,8%. Para esta faixa de RSMg, a alteração de pH foi significativa, apesar da eficiência na remoção de amônia também em pH ácido. Em termos de concentração, a amônia com concentração inicial de 64,3 mg.L⁻¹ para 28,2

mg.L⁻¹no tratamento 1; 28,3 mg.L⁻¹ no tratamento 2; 11,9 mg.L⁻¹no tratamento 3 e 1,4 mg.L⁻¹ no tratamento 4.

Comparando-se os tratamentos 1 e 2, nos quais as concentrações de RSMg são iguais (4.5 mg.L⁻¹) e a diferença se encontra apenas no pH, os tratamentos não mostraram variações. Diferentemente do observado, o pH elevado deveria favorecer a precipitação da estruvita, entretanto, esta condição é descrita principalmente em condições de supersaturação de pelo menos um dos íons envolvidos, *i.e.*, nem mesmo o cátion Mg²⁺ estava em supersaturação. Ainda, como o efluente não teve uma correção nas proporções entre Mg:N:P, os resultados podem ser diferentes daqueles esperados, salientando ainda que o efluente — e também o RSMg — é uma mistura complexa com vários interferentes no processo.

Entre tratamentos 3 e 4 a diferença, novamente, é o parâmetro pH, ambos com concentração magnésio iguais (13.5 mg.L⁻¹). Nesta nova comparação, percebe-se que a faixa de pH= 9 favorece a precipitação da estruvita, com diferença significativa. Valores de pH entre 7,3 e 7,8 favorecem mecanismos biológicos da precipitação da estruvita, enquanto que em pHs maiores que 8,3, os mecanismos químicos de precipitação são favorecidos (MORITA; AVILA; AIDAR, 2019).

Comparando-se os tratamentos 1 e 3 (pH=4), o residual de N amoniacal em T1 foi de 28,2 mg.L⁻¹, enquanto em T3 o residual foi de 11,9 mg.L⁻¹, diferença estatisticamente significativa. Comparando os tratamentos 2 e 4 (pH=9), o residual de N amoniacal foi de 28.3 mg.L⁻¹e 1,4 mg.L⁻¹, respectivamente, diferença também significativa. Dentro de um mesmo pH, a elevação da concentração do cátion Mg²⁺ foi sempre significativamente relevante para remoção da amônia, em cujo resultado buscava-se a supersaturação. A análise estatística, desta forma, mostrou que houve interação entre pH e concentração de RSMg, observando-se a remoção de amônia após os tratamentos. A precipitação da estruvita em concentração de 13.5 mg.L⁻¹de magnésio mostrou-se mais eficiente. Tal observação deve-se ao fato do efeito do íon comum, em que o magnésio em excesso desloca o equilíbrio de precipitação da estruvita (CASTRO,

2014; MORITA; AVILA; AIDAR, 2019). Ademais, em pHs alcalinos, a concentração dos ânions fosfatos são aumentadas, assim como a concentração da amônia molecular é diminuída (equilíbrio amônia/amônio). A forte interação entre Mg^{2+} e HPO_4^{2-}/PO_4^{3-} pode estabelecer condições para a entrada de $NH_{3(aq)}$ no cristal, devido ao tamanho menor em relação ao cátion amônio. Com a entrada de amônia, ela reage com HPO_4^{2-} , modificando a ligação H – PO_4 , resultando na formação de pontes de hidrogênio entre o Mg^{2+} hexahidratado (octaédrico) com NH_4^+ e PO_4^{3-} , as quais estabilizam o cristal (TANSEL; LUNN; MONJE, 2018). A solubilidade da estruvita em pH alcalino também é bastante baixa.

Desta forma, a condição ótima foi definida pelo tratamento 4, o qual foi repetido em maiores volumes na sequência, assim como houve ampliação nos parâmetros analisados.

3.3.3 Tratamento do Efluente Suinícola na Condição Ótima

A Tabela 2 apresenta a concentração remanescente de fosfatos e amônia no efluente, após tratamento.

Tabela 2: Concentração remanescente pós-tratamento

Parâmetro	Concentração remanescente pós-tratamento (mg.L ⁻¹)
Amônia	1,4
Fosfato	5,42

Para o íon fosfato, analisado apenas em condição ótima de tratamento, houve redução de 23,4% na concentração deste nutriente no efluente. A concentração inicial de fosfatos era de 7,07 mg.L⁻¹, o que denota uma proporção do fosfato muito abaixo da proporção de N amoniacal, dificultando a nucleação e cristalização da estruvita. Os íons

sulfato presentes no meio parecem não ter competido com fosfatos, conforme demonstram os resultados da Tabela 3.

Tabela 3: Concentração dos íons antes e após a realização do tratamento

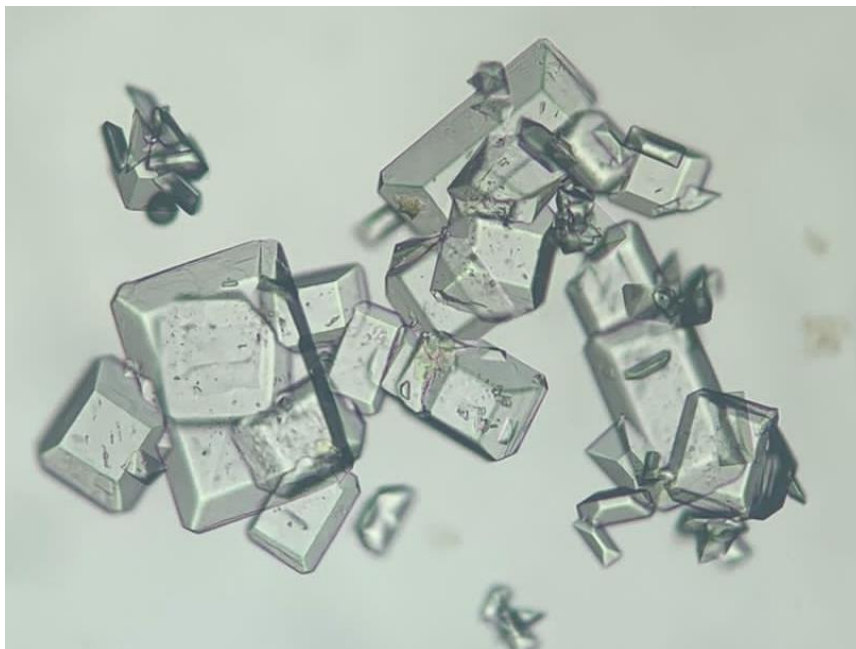
Parâmetro	Efluente Bruto	Efluente tratado
Carbonato de cálcio ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	149,0	56,0
Sulfato (mg.L^{-1})	49,20	51,40
Cálcio (mg.L^{-1})	59,6	22,4
Magnésio (mg.L^{-1})	72,0	38,0
Potássio (mg.L^{-1})	35,4	21,3

Apesar da excelente remoção da amônia no efluente, a formação de cristais de estruvita em meios complexos pode ser dificultada por fatores como a presença de íons competidores, como os analisados neste estudo.

Íons como carbonato (CO_3^{2-}) e cálcio (Ca^{2+}) afetam negativamente a produção da estruvita, uma vez que o íon carbonato reage com o íon magnésio e o íon fosfato reage com o íon cálcio (LE CORRE *et al.*, 2005; WU *et al.*, 2022). O íon sulfato (SO_4^{2-}), por outro lado, compete com o íon fosfato (KABDAŞLI; ATALAY; TÜNAY, 2017), o que parece não ter ocorrido. Já o íon potássio (K^+) pode competir com o íon amônio (NH_4^+), produzindo a K-estruvita ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), diminuindo a recuperação do nitrogênio (ZENG; LI, 2006). Íons carbonato, cálcio e potássio tiveram suas concentrações reduzidas, o que denota participação nos processos de complexação/nucleação/precipitação, o que também dificultou a formação de estruvita. A efetividade na remoção de amônia e as concentrações de Mg^{2+} e K^+ antes e depois dos tratamentos, considerando evidentemente o *input* ocasionado pelo RSMg adicionado, direcionam para a não formação da K-estruvita. Notadamente Mg^{2+} e N amoniacal tiveram suas maiores reduções, limitadas pela baixa concentração de fosfatos no que se refere à produção de estruvita.

A formação e o crescimento dos cristais estão relacionados fortemente ao pH, íons interferentes, supersaturação, força iônica da solução, tempo de retenção dos cristais e agitação (CAPDEVIELLE *et al.*, 2013). Neste estudo, a formação de precipitado foi pequena, motivado pelas concentrações iniciais dos diferentes íons. Apesar disso, após centrifugação, foi encontrado no resíduo sólido obtido pequenas frações de cristais de estruvita, comprovando a formação da substância. No entanto, não foi possível a sua quantificação devido à limitação de produção especialmente ocasionada pela baixa concentração de fosfatos. A Figura 2 apresenta os cristais de estruvita, entre outros possíveis, caracterizados por microscopia óptica. Habitualmente, em urinálise e sedimentoscopia, estes cristais são descritos como “tampa de caixa”, pois apresentam morfologia bastante definida (DE CARVALHO, 2008; DOMINGUETI; MÁXIMO; SALVIANO DA SILVA, 2020; NAVARRO, 2021).

Figura 2: Cristais de Estruvita por Microscopia Óptica



A fonte de magnésio de baixo custo traz consigo a presença de impurezas, especialmente o Ca^{2+} , assim como disponibiliza o Mg a partir do seu hidróxido, não sendo a melhor fonte deste cátion para efetivação da precipitação da estruvita, especialmente quando se é necessária uma elevada concentração do Mg para buscar condições de supersaturação, devido principalmente à baixa concentração de fosfatos.

A limitação na precipitação poderia ser superada pelo enriquecimento com íons, de forma a melhorar a proporção Mg:N:P. Mesmo em baixas concentrações, o fosfato não foi totalmente consumido, devido à competição com outros íons presentes, como os carbonatos. De toda forma, sem qualquer adição de fosfatos e N amoniacal, houve a formação do mineral alvo, o que denota potencialidade da técnica para estes dois resíduos aqui estudados, o efluente suinícola e o RSMg.

3.4 Conclusões

A produção da estruvita através de efluentes suínos e RSMg mostrou-se promissora. A recuperação de nutrientes obteve bons resultados, como 97,8% de recuperação de nitrogênio e 23,4% para o fósforo, isso em condições de pH=9 e concentração da solução de efluente industrial em 13,5 mg.L⁻¹.

No entanto, o efluente suíno e o magnésio de baixo custo são resíduos, ambos ricos em íons que podem concorrer entre si na precipitação, o que demanda continuação dos estudos buscando-se uma concentração de Mg, a partir do RSMg aqui proposto, que não necessite de acidificação para dissolução. A diminuição na concentração de RSMg dependerá ainda mais da elevação na concentração de íons fosfato, que deve ser reavaliada de forma minimamente a manter a concentração dos demais interferentes em padrões similares aos aqui apresentados, pois houve a formação do cristal alvo.

Praticamente todo o N amoniacal não foi perdido para o ambiente na forma de amônia, além da recuperação de ¼ do fósforo total no efluente suíno. Em termos ambientais, seja pela prevenção à contaminação por amônia, seja pelo uso mais sustentável dos recursos naturais via recuperação de fósforo, os objetivos foram alcançados, contribuindo com novas informações para aplicação desta tecnologia ambiental.

Ressalta-se que, neste estudo, dois resíduos potenciais poluidores são tratados entre si, com pouco uso de outros reagentes e recursos e, ainda, sem outros gastos, trazendo como produto uma molécula capaz de agir como fertilizante agrícola com alto valor agrônômico. A limitação de produção da estruvita devido aos custos do Mg pode ser superada pela utilização deste resíduo amplamente disponível, necessitando de testes adicionais que permitam a quantificação e melhor qualificação da estruvita.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os experimentos apresentados no capítulo 3 e ainda levando em consideração os resultados obtidos, considera-se a nível macro, para além dos resultados experimentais, que existe uma condição de reorganização do social em relação à natureza.

Sobre a alimentação humana, por exemplo, existe uma preocupação, necessária, de diversos segmentos da sociedade para que o futuro, a saúde e o desenvolvimento da humanidade não sejam comprometidos. Investimentos como os que acontecem em Santa Catarina, tais como aqueles ligados à produção suinícola, são justificáveis. Entretanto, em termos ambientais, ainda há muito o que se fazer. Nas atividades humanas sempre haverá a produção de resíduos; cabe então a nós a reflexão sobre a geração/reutilização/descarte destes.

No formato como concebemos a produção da estruvita, utilizando efluente suíno e o resíduo industrial, percebemos que a estruvita é um dos modos de reutilizar estes resíduos de forma sustentável e ambientalmente amigável e, para além disso, o objetivo de “consumo e produção sustentáveis” é alcançado no que se refere a reinserção de resíduos como matéria prima. Relembrando apenas que, para a produção da estruvita, a partir do efluente suíno, é necessária minimamente a adição de magnésio e este, por sua vez é tido como custoso. O resíduo industrial, por sua vez, é descartado em aterros e este processo traz despesas à empresa. Utilizando este resíduo como fonte de magnésio, superam-se os custos de descarte do resíduo e os gastos maiores com a produção da estruvita, tornando-a viável. E é neste momento que o objetivo “água potável e saneamento” é alcançado, uma vez que tratar os efluentes é uma das medidas possíveis para a prevenção da contaminação da água.

Entendemos que a estruvita é um fertilizante que tem muito potencial e deve ser explorada como um recurso para a diminuição dos custos na produção de alimentos. E para além disso, ela contribui com a diminuição da exploração de recursos naturais e

com lançamento de substâncias agressivas ao meio ambiente. Nesse viés, este trabalho vai ao encontro do objetivo de desenvolvimento sustentável “fome zero e agricultura sustentável”, tornando possível a redução de custos com a produção de alimento, uma vez que permite contornar gastos com fertilizantes e ainda contribuir com emissão de efluentes com menor potencial poluidor, o que é possibilitado ao se reciclar os nutrientes.

Tendo em vista, neste momento, o pequeno agricultor criador de suínos, tornar a tecnologia de produção de estruvita disponível e viável economicamente é trazer benefícios e recursos para ele. E é neste sentido que a economia circular pode ser pensada e posta em prática. Cabe à sociedade valorar esse fertilizante e possibilitar sua inserção no mercado, contribuindo com a distribuição de renda e com o meio ambiente.

5 REFERÊNCIAS

AMARAL, L. F. *et al.* Mecanismos de hidratação do óxido de magnésio. **Cerâmica**, v. 53, p. 368–372, 2007.

American Public Health Association Americanwaterworks Association; Water Pollution Control Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington: American Publications, 1995.

ARCAS-PILZ, Verónica *et al.* Recovered phosphorus for a more resilient urban agriculture: Assessment of the fertilizer potential of struvite in hydroponics. **Science of the Total Environment**, v. 799, p. 1–10, 2021.

ASTALS, S. *et al.* Nitrogen recovery from pig slurry by struvite precipitation using a low-cost magnesium oxide. **Science of The Total Environment**, v. 768, p. 1–8, 2021.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta; LAVERMAN, Leroy. **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.

BRADFORD-HARTKE, Zenah; RAZMJOU, Amir; GREGORY, Leslie. Factors affecting phosphorus recovery as struvite: Effects of alternative magnesium sources. **Desalination**, v. 504, p. 1–10, 2021.

CAPDEVIELLE, Aurélie *et al.* Optimization of struvite precipitation in synthetic biologically treated swine wastewater—Determination of the optimal process parameters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 244–245, p. 357–369, 2013.

CARMONA, Juan Carlos Lopez. **Recuperação de nitrogênio e fósforo na forma de estruvita a partir de lodo gerado em processo biológico de tratamento de esgoto.** 2017. 1–125 f. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

CASTRO, Samuel Rodrigues. **Precipitação de Estruvita: recuperação de nitrogênio e fósforo utilizando fontes alternativas de reagentes.** 2014. 1–157 f. - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CASTRO, Samuel Rodrigues *et al.* Precipitação química de estruvita: Recuperação de nutrientes em reator cônico de leito fluidizado utilizando magnésia industrial de baixo custo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 259–268, 2015.

CORDELL, Dana; WHITE, Stuart. Life's Bottleneck: Sustaining the World's Phosphorus for a Food Secure Future. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 39, n. 1, p. 161–188, 2014.

DE CARVALHO, Tatiane Furtado. **A Importância da Patologia Clínica na Veterinária: Hematologia e Urinálise em Pequenos Animais.** 2008. - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2008.

DEGRYSE, Fien *et al.* Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers – effect of soil pH, granulation and base excess. **Plant and Soil**, v. 410, n. 1–2, p. 139–152, 2017.

DOMINGUETI, Caroline Pereira; MÁXIMO, Ariane Silva; SALVIANO DA SILVA, Raquel. **Atlas de Urinálise.** 2020. – Universidade Federal de São João Del-Rei, Divinópolis, 2020.

GRASSHOFF, K.; EHRHARDT, M.; KREMLING, K. (org.). **Methods of Seawater Analysis**. 2. ed. Florida: Verlag Chemie, 1983.

HU, Lei *et al.* Simultaneous recovery of ammonium, potassium and magnesium from produced water by struvite precipitation. **Chemical Engineering Journal**, v. 382, p. 1–12, 2020.

HUANG, Haiming *et al.* Removal of ammonia from landfill leachate by struvite precipitation with the use of low-cost phosphate and magnesium sources. **Journal of Environmental Management**, v. 145, p. 191–198, 2014.

KABDAŞLI, Işık; ATALAY, Zeynep; TÜNAY, Olcay. Effect of solution composition on struvite crystallization. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 92, n. 12, p. 2921–2928, 2017.

KY, Nguyen Minh *et al.* Investigation of Nitrogen and Phosphorus Recovery from Swine Wastewater by Struvite Crystallization. **Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University**, v. 67, n. 1, p. 65–74, 2022.

LE CORRE, Kristell S. *et al.* Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity. **Journal of Crystal Growth**, v. 283, n. 3–4, p. 514–522, 2005.

LI, Xuewei *et al.* Phosphate recovery from aqueous solution via struvite crystallization based on electrochemical-decomposition of nature magnesite. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 1–10, 2021.

LI, Xuewei *et al.* Struvite crystallization by using active serpentine: An innovative application for the economical and efficient recovery of phosphorus from black water. **Water Research**, v. 221, p. 1–9, 2022.

MAAß, Oliver; GRUNDMANN, Philipp; POLACH, Carlotta von Bock und. Added-value from innovative value chains by establishing nutrient cycles via struvite. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 126–136, 2014.

MEMELLI, Marina *et al.* Recuperação de nutrientes via precipitação de estruvita para uso agrícola – uma revisão. *Em: Anais do Workshop Internacional de Biorremediação de Áreas Contaminadas*. Vitória, ES, Brasil. 2018.

MORITA, Dione Mari; AVILA, Renan de Luca; AIDAR, Fernando Ngan. Nucleação na formação de estruvita: estado da arte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 637–654, 2019.

MOTTA, Wladimir Henriques. O papel das ecoinovações na transição para uma Economia Circular. **Liinc em Revista**, v. 18, n. 1, p. 1–18, 2022.

NAVARRO, Fábio Castilho. **Perfil Cristalúrico em Ovinos Suplementados com Cloreto de Amônio**. 2021. 1–46 f. - Universidade Estadual Paulista - Júlio de Mesquita Filho, Araçatuba, 2021.

OMIDIRE, Niyi S. *et al.* Evaluation of electrochemically precipitated struvite as a fertilizer-phosphorus source in flood-irrigated rice. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 1, p. 739–755, 2022.

PANTANO, Glauca *et al.* Sustainability in phosphorus use: a question of water and food security. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732–740, 2016.

PEREIRA, Lilian Paula Faria; MERCANTE, Cacilda Thais Janson. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água: uma revisão. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 31, n. 1, p. 81–88, 2005.

PINAFFI, C. D.; SCANDELA, A. P. J.; SANTOS, C. H. Seasonal performance of aquatic macrophytes in improving physicochemical parameters of swine wastewater. **Brazilian Journal of Biology**, v. 80, n. 4, p. 897–906, 2020.

RECH, Ioná *et al.* Solubility, Diffusion and Crop Uptake of Phosphorus in Three Different Struvites. **Sustainability**, v. 11, n. 134, p. 1–15, 2019.

Relatório Anual 2022. **Associação Brasileira de Proteína Animal**. São Paulo, 01 de out. de 2022. Disponível em: <<https://abpa-br.org/mercados/>>. Acesso em 01 de out. de 2022.

ROBLES-AGUILAR, Ana A. *et al.* Effect of Applying Struvite and Organic N as Recovered Fertilizers on the Rhizosphere Dynamics and Cultivation of Lupine (*Lupinus angustifolius*). **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1–17, 2020.

RODRIGUES, Denis Manuel *et al.* Are alternative magnesium sources the key for a viable downstream transfer of struvite precipitation? Assessment of process feasibility and precipitate characteristics. **Journal of Water Process Engineering**, v. 45, p. 1–10, 2022.

RODRIGUES, Leticia Mothé do Nascimento; BAZONI, Raniella Falchetto; COTTA, Aloísio José Bueno. Revisão de estudos sobre a recuperação de amônia via precipitação de estruvita. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 6, n. 9, p. 20–36, 2021.

SAKTHIVEL, S. Ramesh; TILLEY, Elizabeth; UDERT, Kai M. Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine. **Science of The Total Environment**, v. 419, p. 68–75, 2012.

SBPC/ML. **Recomendações da Sociedade Brasileira de Patologia e Clínica / Medicina Laboral**. 1. ed. Barueri: Manole, 2017.

SCHOTT, Chris *et al.* Phosphorus recovery from pig manure: Dissolution of struvite and formation of calcium phosphate granules during anaerobic digestion with calcium addition. **Chemical Engineering Journal**, v. 437, p. 1–14, 2022.

SENGUPTA, Sukalyan; NAWAZ, Tabish; BEAUDRY, Jeffrey. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. **Current Pollution Reports**, v. 1, n. 3, p. 155–166, 2015.

SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.; HOLLER, F. James. **Fundamentos de Química Analítica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

TABATABAI, M. A. A Rapid Method for Determination of Sulfate in Water Samples. **Environmental Letters**, v. 7, n. 3, p. 237–243, 1974.

TANSEL, Berrin; LUNN, Griffin; MONJE, Oscar. Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: A review of magnesium-ammonia-phosphate interactions. **Chemosphere**, v. 194, p. 504–514, 2018.

ULUDAG-DEMIRER, S.; DEMIRER, G.N.; CHEN, S. Ammonia removal from anaerobically digested dairy manure by struvite precipitation. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 12, p. 3667–3674, 2005.

VIER, Margarete Blume *et al.* Reflexões sobre a Economia Circular. **Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 4, p. 27–47, 2021.

WANG, Fang *et al.* Phosphate Recovery from Swine Wastewater by a Struvite Precipitation Electrolyzer. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2019.

WANG, Qiming *et al.* Sustainable reclamation of phosphorus from incinerated sewage sludge ash as value-added struvite by chemical extraction, purification and crystallization. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 717–725, 2018.

WANG, Xiaonan *et al.* Water quality criteria of total ammonia nitrogen (TAN) and unionized ammonia (NH₃-N) and their ecological risk in the Liao River, China. **Chemosphere**, v. 243, p. 1–8, 2020.

WU, Jinzhu *et al.* Effects of Physicochemical Parameters on Struvite Crystallization Based on Kinetics. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, p. 1–11, 2022.

WU, Simiao *et al.* Enhancing recovery of magnesium as struvite from landfill leachate by pretreatment of calcium with simultaneous reduction of liquid volume via forward osmosis. **Science of The Total Environment**, v. 610–611, p. 137–146, 2018.

YAN, Haiyang *et al.* Ammonia capture from wastewater with a high ammonia nitrogen concentration by water splitting and hollow fiber extraction. **Chemical Engineering Science**, v. 227, p. 1–12, 2020.

YE, Xin *et al.* Dissolving the high-cost with acidity: A happy encounter between fluidized struvite crystallization and wastewater from activated carbon manufacture. **Water Research**, v. 188, p. 1–13, 2021.

YETILMEZSOY, Kaan *et al.* Feasibility of struvite recovery process for fertilizer industry: A study of financial and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 152, p. 88–102, 2017.

ZENG, Le; LI, Xiaomei. Nutrient removal from anaerobically digested cattle manure by struvite precipitation. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 5, n. 4, p. 285–294, 2006.