

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO BIBLIOMÉTRICA PARA A REMOÇÃO DE FÓSFORO PRESENTE NO ESGOTO SANITÁRIO ATRAVÉS DA PRECIPITAÇÃO QUÍMICA UTILIZANDO A ESCÓRIA DE AÇO COMO FONTE ALTERNATIVA DE CÁLCIO E MAGNÉSIO

BIBLIOMETRIC EVALUATION FOR THE REMOVAL OF PHOSPHORUS PRESENT IN SANITARY SEWAGE THROUGH CHEMICAL PRECIPITATION USING STEEL SLAG AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF CALCIUM AND MAGNESIUM

Recibido el 1 de octubre de 2023. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

The recovery of phosphorus present in sewage through chemical precipitation was addressed in this study. The objective was to evaluate the research trends and the correlations of academic networks related to the use of steel slag as an alternative source of Ca and Mg in the removal of phosphorus from sewage. The publications between the years 2017 and 2023 were mapped through the Bibloshiny interface, which is a bibliometrix tool. Among the results found in the panorama of publications, it was identified that China is the country that published the most during this period and it was observed that there was a gradual increase in the number of publications over the years. Among the identified gaps, the lack of crystallographic studies of the precipitates with an approach to the properties of the crystalline structures formed in the systems, as well as the use of slag with granulometries greater than 20 mm in reactive filters and systems with operating periods longer than 1 year.

Keywords: phosphorus recovery, sewage, steel slag, dephosphate and bibliometrix.

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

² Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Avenida Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras - Vitória - ES - CEP: 29075-910 - Brasil. Email: jana_acz@hotmail.com

Resumo

A recuperação de fósforo presente no esgoto através da precipitação química foi abordada nesse estudo. O objetivo foi avaliar as tendências das pesquisas e as correlações das redes acadêmicas relacionadas ao uso da escória de aço como fonte alternativa de Ca e Mg na remoção de fósforo do esgoto. Mapeou-se as publicações entre os anos de 2017 e 2022 através da interface *Bibloshiny* que é uma ferramenta do *bibliometrix*. Dentre os resultados encontrados do panorama das publicações, foi identificado que a China é o país que mais publicou durante esse período e observou-se que ocorreu um aumento gradual do número das publicações com o passar destes anos. Dentre as lacunas identificadas, destacam-se a falta de estudos cristalográficos dos precipitados com abordagem das propriedades das estruturas cristalinas formadas nos sistemas, assim como, a utilização de escória com granulometrias maiores que 20 mm nos filtros reativos e sistemas com períodos de operações superiores a 1 ano.

Palavras-chave: recuperação de fósforo, esgoto sanitário, escória de aço, desfosfatação e *bibliometrix*.

Introdução

O crescimento populacional tem gerado pressão sobre diversos recursos naturais, não só pela necessidade de produzir mais alimentos para suprir toda a população, mas também pelo aumento na produção de resíduos que geralmente são descartados de forma inadequadas, principalmente em regiões menos desenvolvidas (Ragnarsdottir *et al.*, 2011; Nedelciu *et al.*, 2020). O aumento da produção alimentícia depende da utilização dos fertilizantes agrícolas, que são substâncias aplicadas no solo que atuam na nutrição das plantas, facilitando o seu crescimento e proporciona o aumento da produtividade, assim como, a melhora da qualidade do produto final (Prasad, 2009).

Dentre os nutrientes presentes nos fertilizantes, encontram-se os macro e micronutrientes, em que os macronutrientes mais importantes para as plantas são: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) (Mahler, 2004). Segundo Nedelciu *et al.*, (2020), a indisponibilidade dos fertilizantes agrícolas, causada pelo esgotamento das rochas fosfáticas, pode ocasionar a escassez dos alimentos, visto o crescente e descontrolado aumento populacional. Além disso, a atual invasão da Ucrânia pela Rússia agravou ainda mais esse problema com a paralização das exportações realizadas pela Rússia, que é o maior exportador de fertilizantes do mundo (Simpson, 2022; Osaki, 2022).

Em contrapartida, a urina humana e as fezes presentes no esgoto sanitário contém altos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) que podem ser recuperados e usados como fonte dos nutrientes para as culturas. Por conta dessas características, quando o esgoto é tratado de forma inadequada e é lançado nos corpos receptores, ocorrem diversos problemas ambientais, como a eutrofização dos corpos hídricos (Medeiros *et al.*, 2020).

A falta de saneamento básico no Brasil gera uma problemática de saúde pública devido às doenças causadas pelo esgoto não tratado. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), somente 43% da população brasileira possuem coleta e tratamento de esgoto. Esse valor é pequeno e tem afetado

além das perdas humanitárias, perdas também econômicas como maiores gastos do Sistema Único de Saúde (SUS). Somente em 2015 as doenças infecciosas intestinais foram responsáveis por 2.35% das internações totais no Brasil, isso correspondeu a 0.7% dos gastos, sendo que dessas internações 43.4% foram de pessoas com 10 anos ou mais de idade (Paiva & de Souza, 2018).

Um indivíduo, em uma cidade de porte médio, produz aproximadamente 100 litros de esgoto por dia e em sua composição estão presentes em média 200 gramas de fezes e 1 quilograma de urina (Andrade Neto, 1997). O esgoto é composto em média por 99.9% de água e 0.1% de sólidos, em que, 75% desses sólidos correspondem à matéria orgânica em decomposição. Dentre as substâncias orgânicas presentes estão os carboidratos, lignina, gorduras, sabões, detergentes sintéticos e proteínas (Qteishat; Myszograj; Suchowska-kisielewicz, 2011).

De maneira geral, o esgoto é constituído por impurezas onde enquadram-se alguns íons comuns, como fosfato, nitrato, cálcio, potássio e magnésio (Dacach, 1991). As concentrações e cargas per capita das formas de nitrogênio e fósforo no esgoto variam de acordo com cada localidade. A carga média de fósforo no esgoto é de 1.2g/hab.d e a média de nitrogênio é de 9.5g/hab.d. Com relação à carga de matéria orgânica, o esgoto possui DQO entre 100-120g/hab.de DBO entre 50-60g/hab.d. (Zanqueta, 2007).

O fósforo total do esgoto apresenta-se como fosfatos nas formas orgânica e inorgânica. A parte inorgânica que estão na forma de ortofosfato e polifosfatos, são originários principalmente dos detergentes superfosfatados e dos produtos de limpeza em geral. O fósforo oriundo dos detergentes correspondem até 50% da concentração total do esgoto. A aplicação dos fertilizantes no solo também são responsáveis pelo seu excesso de fósforo nos corpos d'água devido serem carreados pela água das regiões agrícolas. Já a parcela orgânica é associada à matéria orgânica (proteínas e aminoácidos) de origens fisiológica (Jordão & Pessôa, 2011).

No esgoto, as formas predominantes de nitrogênio são o nitrogênio orgânico e a amônia. O orgânico faz parte do grupo da amina, já a amônia origina-se principalmente na uréia, que é hidrolisada e dificilmente encontrada no esgoto. Ambos formatos de nitrogênio são determinados pelo método Kjeldahl, denominado Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). A maior parte do NTK do esgoto originam-se das fontes fisiológicas (PROSAB, 2009). Já o potássio assim como o fósforo existente no esgoto, são provenientes principalmente dos sabões e detergentes que possuem em suas composições os sais de sódio e potássio de diversos ácidos graxos. O magnésio e cálcio originam-se das excretas humanas (Osório & Oliveira, 2001; Dacach, 1991).

Muitos elementos contidos no esgoto fazem parte da composição básica dos fertilizantes agrícolas como os nitratos de cálcio, amônio e potássio, sulfato de amônio e uréia, superfosfatos simples, duplo e triplo, cloreto e, sulfato e carbonato de potássio. A recuperação desses

nutrientes e a sua reutilização pelas indústrias agrícolas como fertilizantes é uma alternativa ecológica que contribui para a preservação das rochas fosfáticas e dos corpos hídricos (Hukari, Hermann, Nättorp, 2016).

A reciclagem de fósforo e nitrogênio através da precipitação química, produzem majoritariamente os minerais estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) e hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$). Devido as suas composições, os mesmos possuem potencial de substituírem os fertilizantes agrícolas comerciais. Além disso, quando esses compostos são precipitados com fontes alternativas de magnésio e cálcio, são produzidos insumos de boa qualidade, eficazes e de baixo custo de produção (Carey *et al.*, 2016). Os fertilizantes compostos por cálcio e magnésio são utilizados e depositados no solo como corretivos de acidez (Castro *et al.*, 2016), sendo a hidroxiapatita mais solúvel em um ambiente mais ácido, enquanto em condições menos ácidas, ela se torna menos solúvel. Fazendo com que a HAP seja propícia a ser utilizada na correção de acidez do solo (Montalvo; McLaughlin; Degryse, 2015).

Sob o ponto de vista da economia circular é importante considerar o uso das fontes alternativas de magnésio e cálcio na precipitação desses compostos. Um exemplo é o uso da escória gerada na fabricação do aço. De acordo com Gomes *et al.*, (2018), cerca de 170 a 250 milhões de toneladas métricas desse coproducto é anualmente gerado em todo o mundo. Devido à grande quantidade produzida e seu impacto negativo ao ambiente, é importante que as indústrias siderúrgicas destinem esse coproducto de forma adequada (Shen; Wu; Du, 2009). Uma possível solução para esse problema é a utilização desse coproducto no processo de remoção de fósforo presente no esgoto, isso porque a escória apresenta ligações químicas que possuem grande afinidade de adsorção química com o fósforo (Liu *et al.*, 2019).

A escória de aciaria LD (BOF) possui em sua composição alguns elementos característicos como o FeO, CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, Cr₂O₃, MnO, P₂O₅ (Yi *et al.*, 2012). Porém, suas características químicas podem variar conforme as modificações dos parâmetros operacionais durante o processo de fabricação do aço (Yildirim & Prezzi, 2011). O estudo das propriedades mineralógicas da escória podem ser realizados através das análises por difração de raio X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e espectrometria no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) (Chand; Paul; Kumar, 2016).

Diversos estudos mostram que a utilização de escória de aço além de ser uma fonte alternativa de Ca e Mg, gera um viés inovador e de grande importância para recuperação dos nutrientes contidos no esgoto sanitário. Um exemplo, são os filtros preenchidos com escória de aço (material absorvente) que são capazes de desfosfatar e desinfectar o esgoto sanitário antes do seu descarte nos corpos d'água (Dunets; Zheng; Dixon, 2015). Para a eficiência do processo, são necessários o controle/adequação de alguns parâmetros operacionais dos

filtros (reatores) de escória. Nesses, se destacam o tempo de detenção hidráulico (TDH), o modelo do fluxo líquido (Claveau-mallet; Wallace; Comeau, 2011), granulometria e a tipologia da escória (Barca *et al.*, 2014; Westholm, 2006).

Todo esse cenário de reciclagem do fósforo contido no esgoto sanitário se enquadra no conceito de inovação frugal ou engenharia frugal (Ragnarsdottir *et al.*, 2011; Molina-Maturano; Bucher; Speelman, 2020). A inovação frugal é associada à sustentabilidade ecológica e caracteriza-se pela diminuição dos custos dos produtos e serviços, além de atuar, principalmente, na produção limpa com o emprego das técnicas que reduzem os impactos ambientais da atividade humana (Albert, 2019). Com a evolução do conceito de sustentabilidade, busca-se o uso da capacidade humana em aplicar técnicas que reduzem as quantidades de materiais e dos resíduos gerados. Torna-se necessário que os bens produzidos possam ser reincorporados ao ciclo produtivo, em um movimento contínuo (Geissdoefer *et al.*, 2017; Amato Neto, 2011). A remoção dos nutrientes presentes no esgoto sanitário, a partir da sua reciclagem, é uma alternativa sustentável de minimizar a problemática da poluição dos corpos d'água e ainda, minimiza a necessidade da retirada dos nutrientes das suas fontes primárias.

A economia circular, a sustentabilidade e a engenharia frugal estão intrinsecamente conectadas e oferecem uma base sólida para estratégias de desenvolvimento sustentável. A economia circular propõe um modelo econômico que visa minimizar resíduos e maximizar a utilização de recursos por meio de práticas como reutilização, reciclagem e remanufatura. Esse enfoque reduz a necessidade de extrair novos recursos, contribuindo para a preservação do meio ambiente e promovendo a eficiência na utilização dos recursos disponíveis (Yousaf *et al.*, 2022).

A sustentabilidade, por sua vez, é um princípio fundamental que busca atender às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades. Ela busca o equilíbrio entre os aspectos econômicos, sociais e ambientais do desenvolvimento, garantindo a utilização responsável e equitativa dos recursos naturais. Ao adotar estratégias de economia circular, organizações e sociedades podem avançar em direção a metas de sustentabilidade, mitigando impactos ambientais e promovendo o bem-estar humano a longo prazo (Tawfik *et al.*, 2022).

A engenharia frugal complementa esses conceitos ao oferecer uma abordagem de design simples, eficiente e acessível, frequentemente em contextos de recursos limitados. Por meio da engenharia frugal, soluções inovadoras podem ser desenvolvidas utilizando menos recursos, ao mesmo tempo em que atendem às necessidades específicas dos usuários. Essa abordagem é especialmente relevante em contextos onde os recursos são escassos ou quando se busca reduzir custos e maximizar a eficiência (Dima *et al.*, 2022; Kahle *et al.*, 2013).

Assim, ao conectar a economia circular, a sustentabilidade e a engenharia frugal, podemos explorar como a implementação de práticas circulares e o desenvolvimento de soluções frugais podem contribuir significativamente para a promoção do desenvolvimento sustentável. Essa integração oferece oportunidades para reduzir o desperdício, otimizar a utilização de recursos e promover um crescimento econômico mais equitativo e ambientalmente consciente (Ezeudu *et al.*, 2022; Androniceanu *et al.*, 2021).

Um exemplo concreto dessa interligação é a remoção de fósforo do esgoto utilizando escória de aço. Ao empregar a escória, um subproduto da indústria siderúrgica, para tratar águas residuais, fecha-se o ciclo de materiais, evitando o desperdício e promovendo a reutilização de recursos. Além disso, essa prática contribui para a sustentabilidade ao mitigar problemas ambientais, como a eutrofização dos corpos d'água. A escolha da escória como agente de remoção de fósforo também demonstra uma abordagem frugal, aproveitando um recurso abundante e subutilizado para uma finalidade eficaz e de baixo custo. Assim, a aplicação da escória de aço no tratamento de esgoto não apenas resolve um problema ambiental, mas também exemplifica como os princípios da economia circular, sustentabilidade e engenharia frugal podem ser integrados para promover soluções sustentáveis em diversas áreas (Vu *et al.*, 2023; Boutet; Comeau, 2018; Zuo *et al.*, 2018; Barca *et al.*, 2018).

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é apresentar uma revisão bibliométrica da literatura, entre 2017 e 2023, sobre o desempenho da escória de aço como fonte alternativa de magnésio e cálcio na remoção de fósforo presente no esgoto sanitário. Além disso, levantar lacunas que deverão ser abordadas para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de desfosfatação do esgoto sanitário usando a escória de aço.

Materiais e métodos

Seleção do portfólio bibliográfico

As bases de busca usadas nesta revisão bibliométrica foram a *Web Of Science* (WoS) e o *Scopus*. Para uma maior precisão no retorno dos resultados, foram utilizados os operados booleanos (AND e OR), a fim de realizar combinações coerentes entre as palavras-chave. As palavras-chave foram definidas em inglês devido ao maior volume de produção bibliográfico nessa língua. Adiante, as sequências das combinações foram respectivas às junções de sinônimos e temas relevantes interconectados entre si, da seguinte forma: (steelmaking slag OR slag) AND (phosphate removal OR phosphorus removal OR phosphorus recovery) AND (sewage OR urine OR wastewater). No *Web Of Science* (WoS) foram utilizados os filtros: chave de busca (todos os campos) e tipo de documentos (artigos e revisões), enquanto que no *Scopus*, os artigos foram selecionados pelo tipo de documento (artigos e revisões) e tipo de acesso (tudo). Esse levantamento ocorreu em fevereiro de 2023.

Após a exportação dos resultados da bibliometria para o *software Excel®*, foram aplicadas as técnicas de filtragem de conteúdo em conformidade com o estabelecido pela metodologia do Proknow-C, *Knowledge Development Process Constructivist* (Viegas et al., 2016). ProKnow-C é um método de análise bibliométrica que visa organizar os conhecimentos e os dados científicos. Através deste método ocorre uma seleção sistemática das informações relevantes existentes na literatura através de algumas etapas pré-definidas. Os artigos são selecionados nos bancos de dados através das palavras-chave e são filtrados de acordo com sua relevância científica por meio de alguns critérios. Por fim, os artigos irrelevantes para a pesquisa são extintos da seleção e é dado o início a análise sistemática com o objetivo de ilustrar as questões de importância e as lacunas a serem abordadas na pesquisa (Ensslin et al., 2010).

A seleção do portfólio bibliográfico foi executada com o auxílio da planilha no *Excel®*. Permaneceram somente os artigos e revisões com fator de impacto maior que 1, publicados entre 2017-2023 e devido ao uso de duas bases de dados, os artigos duplicados foram excluídos.

Em uma segunda etapa, através da leitura dos títulos e resumos, foram selecionados os artigos que abordavam a remoção de fósforo contidos no esgoto sanitário e que estavam consorciado com a utilização de diversas tipologias de escórias de aço. Por fim, os artigos selecionados foram lidos na íntegra e submetidos para análise bibliométrica utilizando o *Biblioshiny* (versão *on-line* do pacote *Bibliometrix*) (Aria; Cuccurullo, 2017).

Resultados e discussão

Processo de triagem dos artigos

Um total de 278 artigos foram identificados na plataforma *Web Of Science* (WoS) e 270 no *Scopus*. Considerando somente os artigos e revisões publicados entre os anos de 2017 e 2023, 114 artigos do *Web Of Science* e 95 do *Scopus* foram inicialmente selecionados. Em seguida, técnicas de filtragem de conteúdo foram aplicadas em conformidade com o estabelecido pela metodologia do Proknow-C, onde chegou-se a um total de 25 artigos, sendo eles: (Lu et al., 2021; Sun et al., 2021; Sun et al., 2021; Vu et al., 2021; Arshad & Hamdan, 2021; Liu et al., 2020; Ahmad et al., 2020a; Ahmad et al., 2020b; Pramanik et al., 2020; Claveau-Mallet & Comeau, 2020; Chen et al., 2020; Claveau-Mallet; Seltani; Comeau, 2020; Kwon et al., 2019; Wang et al., 2019; Kim et al., 2019; Xu et al., 2019; Liu et al., 2019; Claveau-Mallet; Boutet; Comeau, 2018; Zuo et al., 2018; Barca et al., 2018; Hamdan; Arshad; Ahmad, 2018; Yuan et al., 2017; Claveau-Mallet et al., 2017; Kuwahara; Yamashita, 2017; Park et al., 2017). A Figura 1 apresenta um resumo detalhado do processo de triagem.

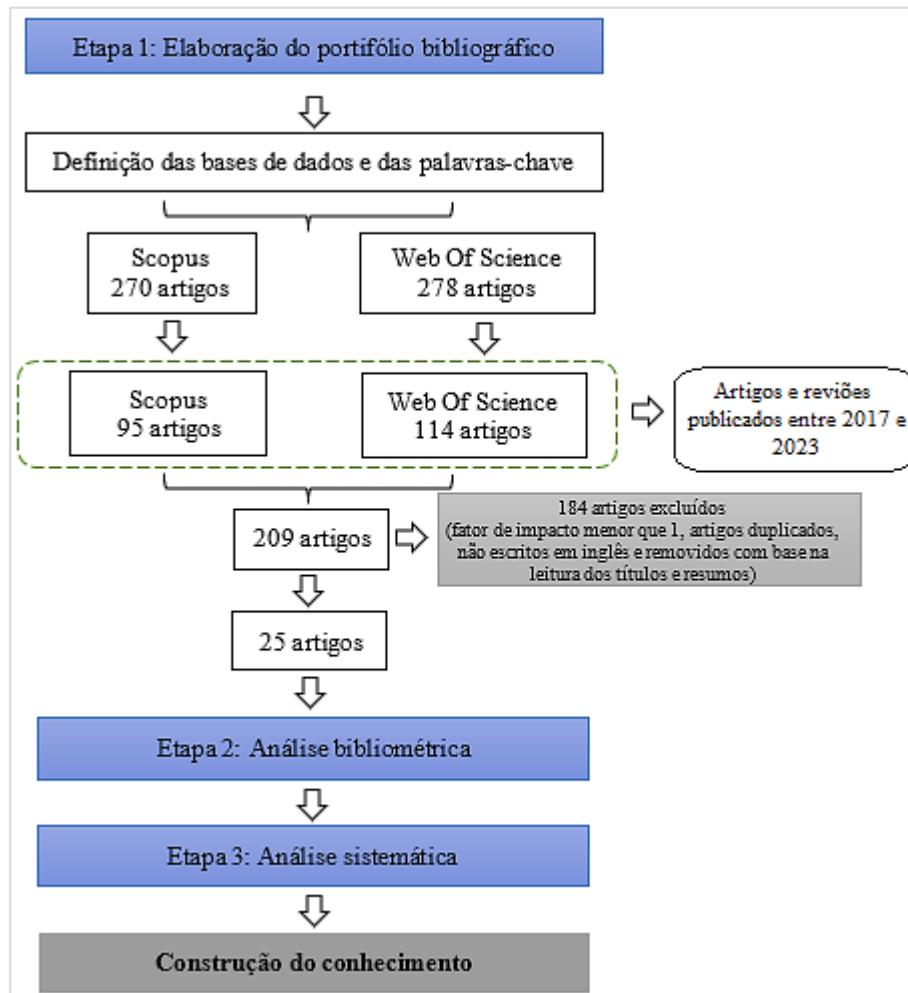


Figura 1. Resumo do processo de triagem com os números dos artigos obtidos em cada etapa. *Fonte: Autoria própria*

A Figura 2 apresenta as 30 palavras-chave encontradas com mais frequência no portifólio bibliográfico analisado, sendo que quanto maior o tamanho da palavra, maior a frequência com que a mesma apareceu no portifólio. Dessa forma fica fácil visualizar, de forma intuitiva, quais as palavras mais relevantes na temática estudada. Um ponto a ser destacado é a ausência de estudos que citaram em suas palavras-chave as fases mineralógicas hidroxiapatita e estruvita, mesmo elas sendo as fases formadas majoritariamente nos processos de recuperação dos nutrientes contidos no esgoto sanitário, quando utilizados na precipitação química íons de Ca e Mg.



Figura 2. Palavras-chave mais frequentes no portifólio bibliográfico selecionado. Fonte: Autoria própria

Dos 25 trabalhos que integraram o portifólio bibliográfico, evidenciou-se que 2 artigos ainda não foram citados e 23 foram citados pelo menos uma vez durante os anos de 2017 a 2023. O número de citações foi expressivo, sendo que 28% dos artigos do portifólio bibliográfico foram citados mais de 10 vezes. Além disso, foi observado que os artigos com maior número de citações foram os mais antigos. O artigo publicado por PARK *et al.*, (2017) foi o que apresentou o maior número de citações (33), seguido pelos trabalhos de Claveau-Mallet; Boutet; Comeau. (2018) e Barca *et al.*, (2018) com 25 e 19 citações, respectivamente.

O número das publicações sobre o tema selecionado tem crescido nos últimos anos, conforme apresentado na Figura 3. Porém, a produção bibliográfica nessa área ainda é considerada muito pequena, visto que somente 25 artigos foram selecionados em um período de 5 anos. Portanto, é evidente a necessidade do desenvolvimento de mais pesquisas abordando a remoção de fósforo do esgoto com a utilização de escórias de aço.

A respeito da internacionalização das publicações, a maior parte dos artigos foram publicados pela China (8), seguida pela Malásia e Canadá, ambos com 4 publicações, conforme apresentado na Figura 4. Nessa análise foi possível identificar as publicações que tiveram autores de um único país (*Single Country Publications – SCP*) bem como as publicações com a participação de autores de diversos países (*Multiple Country Publications – MCP*). É relevante ressaltar que as fontes dos artigos selecionados que se destacaram com maior número de publicações nesse tema foram: *Water, Journal of Environmental Management, Environmental Science and Pollution Research, Environmental Technology e Journal of Environmental Management*.

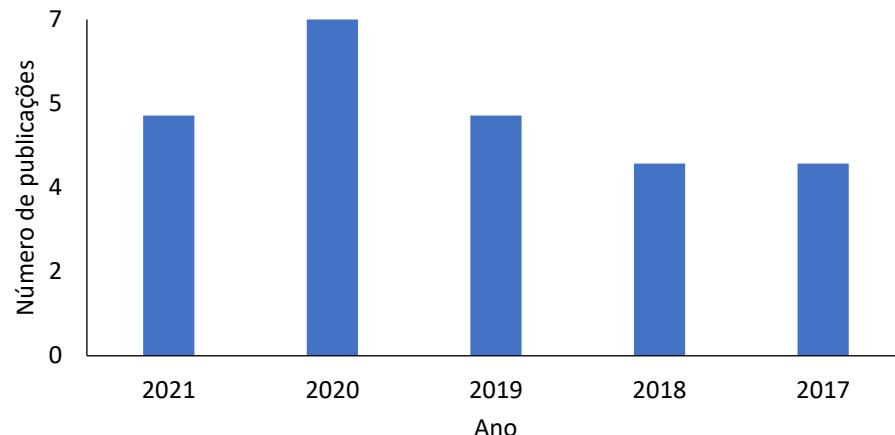


Figura 3. Quantidade de artigos publicados por ano. *Fonte: Autoria própria*

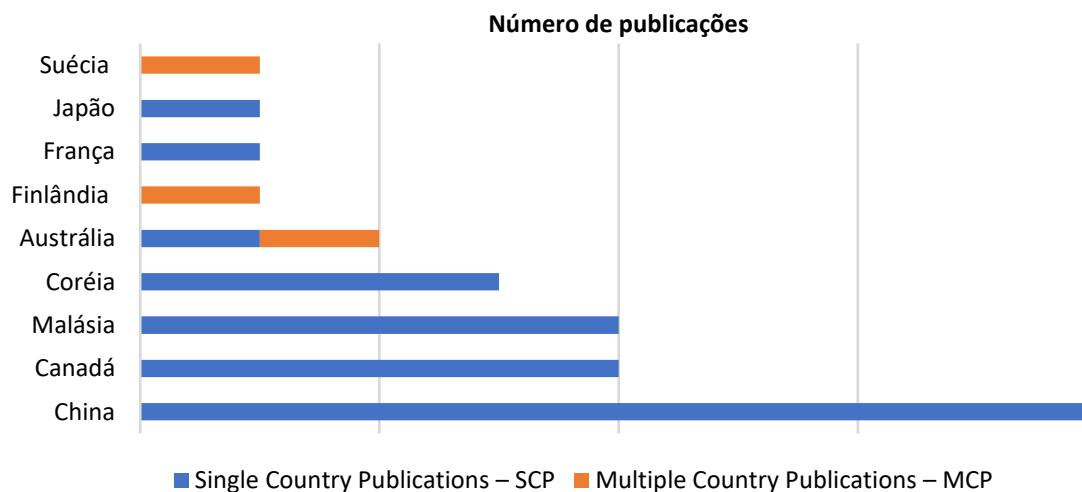


Figura 4. Número de artigos publicados por país. *Fonte: Autoria própria*

Discussão

Mecanismo da remoção do fósforo

A remoção de fósforo do esgoto em filtros de escórias ricos em cálcio associa-se com a dissolução da escória na água. A dissolução da escória é constituída por reações cinéticas complexas de diversas fases mineralógicas como bredigite ($\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)_8$) e gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$). Quanto

maior a concentração de cálcio na escória utilizada como adsorvente, maior será o valor do seu pH. O alto valor de pH é o fator principal que garante a eficiência de remoção do fósforo. Sabe-se que em condições alcalinas o fósforo precipita em fosfatos de cálcio metaestáveis e que no decorrer do processo são transformados em hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), que é uma fase mineralógica estável (Claveau-Mallet; Wallace; Comeau, 2011).

Segundo Barca *et al.*, (2012), a hidroxiapatita é o principal precipitado de fósforo formado na superfície da escória nos filtros/reactores. Porém Valsami-Jones (2001), destaca que antes da formação da fase cristalina desse cristal, uma fase amorfá de Ca-P é formada.

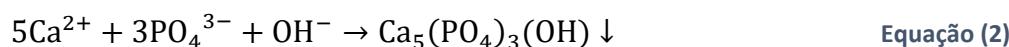
Em filtros reativos ocorre forte ligação entre o fósforo e o pH. Nos filtros, as partículas ficam retidas e quando a velocidade do fluxo líquido for alta, os precipitados são lixiviados. Claveau-Mallet; Wallace; Comeau (2011), detectaram que em TDH de 1.5 e 3.8 h ocorre o carreamento das partículas precipitadas, já quando o TDH é alto, as partículas ficam retidas e ocorrem uma espécie de aglomeramento, podendo ser de forma organizada ou desorganizada. O ordenamento das partículas depende do modelo de fluxo empregado no filtro.

Como mencionado acima, quanto maior o tempo de contato com o meio granular, maior é a obtenção do pH. Esse fato ocorre devido à escória ter maior tempo de liberação do OH^- no meio líquido através da dissolução do CaO (Barca *et al.*, 2013). A Equação 1 expressa esse efeito:



Quanto maior o TDH no FRE, melhor será a remoção de fósforo total e para as aplicações em sistemas em maiores escalas, torna-se necessário um maior volume do meio granular, que consequentemente elevará o pH do efluente.

Nos filtros reativos de escória ricas em Ca, a remoção de $\text{PO}_4 - \text{P}$ é baseada principalmente na precipitação de $\text{Ca} - \text{PO}_4 - \text{P}$ (Bowden *et al.*, 2009). A formação dos precipitados são exclusivamente dependentes dos valores do pH e das concentrações de Ca^{2+} e de $\text{PO}_4 - \text{P}$. Segundo Valsami-Jones (2001) e (Barca *et al.*, 2013), podem ser formados nos filtros: fosfatos de cálcio amorfos, fosfato dicálcico, fosfato dicálcico dihidratado, fosfato octocálcico, fosfato tricálcico e a hidroxiapatita. A precipitação de hidroxiapatita ocorre como mostrado na Equação 2:



Além disso, em análises criteriosas dos processos de remoção de fósforo do esgoto sanitário com o uso de escória de aço em filtros, com alimentação em formato de batelada, é de suma importância

usar modelos de isotermas de adsorção para tratar os resultados experimentais (Vu *et al.*, 2021). Nesse estudo desenvolvido por Vu *et al.*, (2021), as isotermas e a cinética de adsorção do fósforo foram estabelecidas, e assim foi possível identificar os principais mecanismos de remoção. A remoção de fósforo por precipitação química mostrou-se dependente, exclusivamente, do nível de pH e da concentração de Ca^{2+} presente na solução aquosa. Os autores observaram que o pH elevado e as altas concentrações de Ca^{2+} são os principais parâmetros para uma boa eficiência de remoção de fósforo no processo de precipitação química.

De maneira geral, o uso da escória siderúrgica no processo de desfosfatação do esgoto ocorre devido a presença em sua composição de óxidos de Ca, Mg, Fe e Al e é uma alternativa eficiente. Esses elementos favorecem o mecanismo de remoção do fósforo por adsorção e precipitação química. Ahmad *et al.*, (2020a), avaliaram o papel do processo de aeração na remoção de ortofosfato do esgoto utilizando sistemas aerados e não aerados, ambos preenchidos com escórias com alto teor de Ca e aplicando diferentes valores de pH (3, 5, 7, 9 e 11). Em outro estudo no mesmo ano, Ahmad *et al.*, (2020b), investigaram o papel do Fe na remoção de fósforo na presença ou ausência de aeração na coluna. Essa pesquisa aplicou os mesmos valores de pH mencionados na pesquisa anterior, a fim de investigar as eficiências de remoção de fósforo e os mecanismos do processo de desfosfatação do esgoto com a utilização da escória de aço apresentando altos teores de FeO.

Características das escórias

Todas as pesquisas selecionadas nesta revisão bibliográfica utilizaram escórias com granulometria de até 20 mm, sendo que a menor granulometria investigada possuía grânulos menores que 45 μm .

Diversas tipologias de escória foram utilizadas nas pesquisas selecionadas, percebeu-se que cada uma relaciona-se com a localidade das usinas que disponibilizaram o coproduto para as pesquisas. Dentre os 25 artigos, somente o artigo publicado por Sun *et al.*, (2021) utilizou escória consorciada à outros materiais, na qual foi produzido um material compósito composto por gesso de dessulfurização de gases de combustão como a principal matéria-prima, bentonita, argila e a escória de aço. Os demais estudos utilizaram: escória de forno elétrico a arco (8), escória de alto forno (3), escória de forno panela (1), escória de aço (5), escória de forno básico de oxigênio (2), escória de alumínio (1), escória de aciaria (2) e escória de ferro níquel (1). Um dos estudos não apresentou qual a tipologia da escória utilizada. A Figura 5 apresenta detalhadamente esses valores.

Autores relatam que cada tipologia de escória contém composições químicas diferentes, assim como suas características físico-químicas para a precipitação de Ca-P são diferentes de acordo com cada lote de escória produzida na usina. A composição da escória influencia diretamente na morfologia e nas características cristalográficas dos cristais precipitados no filtro (Drizo *et al.*, 2002).

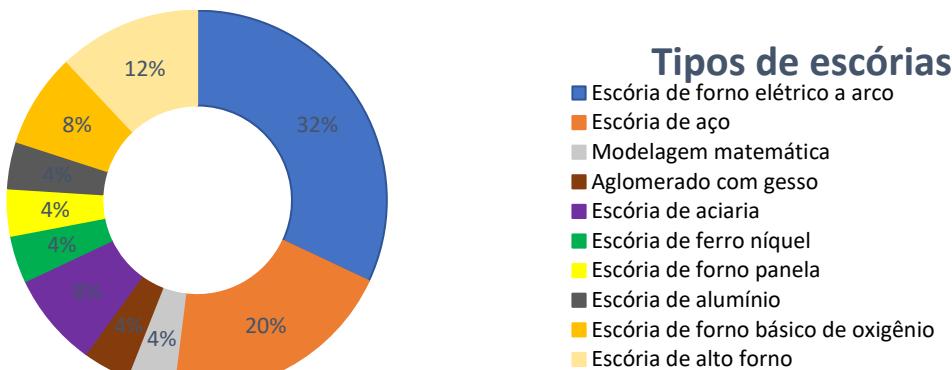


Figura 5. Tipode de escórias utilizadas nos estudos selecionados. Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que o termo *constructed wetland* encontra-se entre as 30 palavras mais citadas no portfólio bibliográfico, conforme apresentado na Figura 2. Essa evidência mostra que, diversas pesquisas têm considerado, a utilização de *wetlands* preenchidos com diversas tipologias de escória de aço como meio filtrante para a remoção de fósforo através do tratamento de esgotos CHEN *et al.*, (2020) utilizaram um *wetland* de fluxo subsuperficial horizontal preenchido com escória de aço e ceramsite para o controle do N/P do efluente. O diâmetro da ceramsite foi de 5-8mm e da escória de 2-3mm.

Já na pesquisa de LU *et al.*, (2021) foi utilizado um *wetland* para a desfosfatação da água de um rio poluído. Para isso, os autores utilizaram como meio filtrante a escória de aço com granulometria entre 10-20mm. Em outro estudo, XU *et al.*, (2019), chegaram a conclusão que o uso da escória como meio granular do *wetland* é bastante favorável, sendo possível alcançar uma eficiência de remoção de 98% e 70% para o fósforo e nitrogênio, respectivamente. Estes valores são consideravelmente altos, quando comparados aos *wetlands* preenchidos somente com brita. Essa eficiência é alcançada devido às características químicas das escórias, onde é favorecido o processo de adsorção química.

A utilização de diferentes tipologias de escória foi investigada por ZUO *et al.*, (2018), na qual fizeram a combinação de cinco filtros verticais, construídos em material plástico transparente, preenchidos com escória e alimentados com esgoto oriundo de fossas sépticas domésticas. Foram utilizados as seguintes tipologias de escória: blast furnace slag (BFS), argon oxygen decarburisation slag (AOD) e electric arc furnace slag (EAF). Em todos os experimentos utilizando as diferentes tipologias de escória, os minerais majoritariamente formados nas superfícies das escórias foram a hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), a calcita (CaCO_3) e a estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sendo que a proporção de cada mineral encontrado foi de acordo com as composições química de cada escória.

Na pesquisa de BARCA *et al.*, (2018), a análise de DRX foi capaz de identificar somente as fases cristalinas de Ca-P, porém o fosfato de cálcio amorfó não pôde ser identificado. Foi verificado que a cristalinidade do precipitado de Ca-P é minimizada com a existência de ligantes orgânicos, ocorrência essa também citada por Claveau-Mallet & Comeau (2020).

Concentrações elevadas de fósforo no esgoto, associadas às altas concentrações de Ca da escória e o favorecimento de um meio com o pH elevado, são as condições químicas ideais para a ocorrência das reações de precipitação de Ca-P (Gonzalez; Penn; Livingston, 2020). Por outro lado, em ambientes de pH baixo, a tendência é que se formem cristais contendo fósforo com características menos cristalinas ou até mesmo sólidos amorfos, que são os sólidos compostos por átomos, moléculas ou íons que não tiveram condições de apresentarem uma ordenação de longo alcance (Zuo *et al.*, 2018).

Fontes de fósforo (P)

A Figura 6 apresenta as fontes de fósforo utilizadas pelos pesquisadores do portfólio bibliográfico selecionado. Foi observado que existe um número considerado de estudos que utilizaram águas residuárias sintéticas (44%), seguido por esgoto sanitário real (20%). Os outros 36% dos estudos utilizaram diversas fontes, incluindo lodo digerido, lixiviado de solo, efluentes de fossa séptica, suinocultura, indústria têxtil e de tratamento secundário, entre outros.

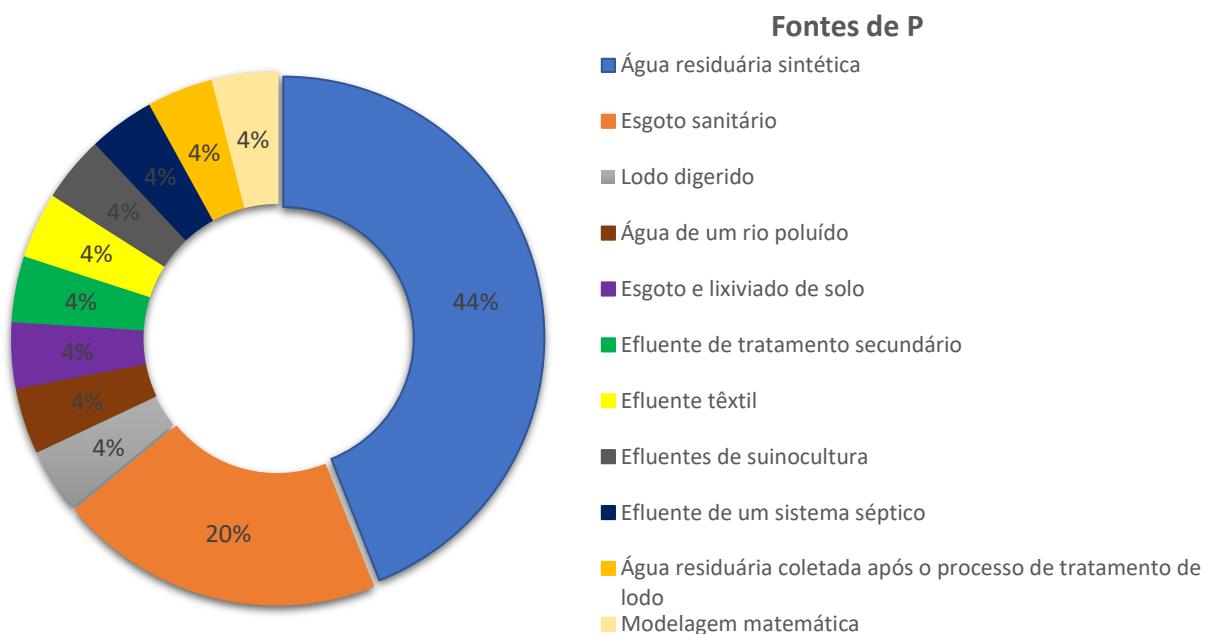


Figura 6. Fontes de fósforo utilizadas nas pesquisas do portfólio biliográfico estudado. Fonte: Autoria própria

Muitos pesquisadores optam pelas águas sintéticas devido a facilidade de se preparar a água resíduária no local de uso, além de oferecer um melhor controle da concentração de fósforo presente em solução. Nos experimentos estudados, a mesma foi produzida com concentração em torno de 10 mg P/L. A fonte de fósforo e potássio utilizada com frequência foi o fosfato monopotássio (KH_2PO_4), que é um sal solúvel, também usado como fertilizante.

Porém, é válido ressaltar a relevância de serem feitas mais pesquisas sobre a desfosfatação do esgoto sanitário (real), haja visto que diversas características físico-químicas são inexistentes em águas resíduárias sintéticas. Além disso, foi observado que a maioria dos estudos consideraram um tempo de operação bem reduzido, sendo que apenas três destes apresentaram um período de operação superior a 365 dias.

Retenção hidráulica dos filtros de escória

Qualquer modelo de filtro reativo de escória está sujeito ao entupimento, que pode ocasionar em falhas hidráulicas. Com o passar do tempo há uma redução da porosidade da camada filtrante bem como diversas modificações no comportamento do fluxo granular. Isso acontece devido ao acúmulo dos sólidos em suspensão, que é composto por precipitados químicos e de material biológico. Um panorama desse efeito em filtros reativos de escória foi abordado por Claveau-mallet & Comeau (2020). Mesmo que o ambiente alcalino de um filtro granular seja, a priori, desfavorável ao crescimento bacteriano, é possível que ocorra a formação de biofilme à longo prazo.

Um modelo sistemático com a finalidade de avaliar o desempenho e eficiência hidrodinâmica dos filtros de escória de aço em condições de funcionamento reais foi investigado por Barca *et al.* (2018). Durante um ano de operação dois filtros de escória estiveram em funcionamento. No início da operação, o filtro de escória BOF/LD (*Basic Oxygen Furnace*) apresentou maior eficiência hidráulica e menor dispersão, quando comparado com o filtro de escória EAF (*Electric Arc Furnace*). Porém, com o passar do tempo o modelo do fluxo hidrodinâmico no interior dos filtros modificou-se devido às mudanças físico-químicas ocorridas. Segundo os autores, essas foram as causas principais da ocorrência do acúmulo dos precipitados, carbonatação da escória e a segregação de partículas no sistema.

Em aplicação de filtros reativos de escória em escala real, a eficiência da remoção de fósforo do esgoto pode ser favorecida se ocorrer um tratamento preliminar antes da sua inserção no filtro reativo. Uma tecnologia capaz de favorecer esse tratamento inicial são os sistemas alagados construídos (SAC), conhecidos como *wetlands* construídos ou também jardins filtrantes. Nos *wetlands* o esgoto é filtrado e nele ocorre alguns processos, sendo eles os físicos (filtração, sedimentação, volatilização), químicos (adsorção, oxidação, redução, precipitação, quelação) e biológicos (degradação e absorção pelos microrganismos). Essa tecnologia tem a capacidade de

reduzir a matéria orgânica do esgoto, tornando a aplicação subsequente no filtro reativo de escória mais eficiente e com menor possibilidade de formação de biofilme, é reduzido o acúmulo dos sólidos que com o passar do tempo ocasiona a retenção hidráulica, aumentando assim a vida útil do filtro de escória. (Claveau-Mallet; Wallace; Comeau, 2011).

Lacunas do conhecimento

De acordo com essa revisão bibliométrica, identificou-se algumas lacunas:

- - Devido a escória ser uma substância com características alcalinas, é gerado no filtro reativo de escória um efluente com pH elevado e não adequado ao parâmetro que atende à Resolução CONAMA número 430/2011 (seção III Art. 21), que é a resolução que dita as condições obrigatórias do lançamento direto dos efluentes oriundos dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário. Não foi identificado pesquisas abordando esse assunto em uma escala de aplicação real. É de conhecimento que esse tratamento pode ocorrer por processos de acidificação com ácidos comerciais como o ácido sulfúrico, por técnicas de injeção de CO₂ ou por sistemas de aeração com ar.
- - Identificou-se a ausência de estudos com abordagem no refinamento estrutural para a identificação das fases cristalinas presentes no material precipitado através da indexação dos picos de Bragg. É importante que além da identificação dos precipitados, das suas morfologias, bem como suas composição químicas, que sejam identificadas quantitativamente as fases cristalográficas presentes, com os referidos parâmetros de rede e o volume das células unitárias dos cristais precipitados.

Conclusões

Conforme descrito nesta análise bibliométrica, uma maneira de remover o fósforo presente no esgoto sanitário é através da sua precipitação química com os íons metálicos presentes na escória de aço, sendo essa uma alternativa sustentável para a produção de fertilizantes fosfatados de liberação lenta.

A maioria das pesquisas que investigaram a remoção de fósforo através de filtros de escória (FRE) utilizaram granulometrias inferiores a 20 mm e efluente sintético. Além disso, apenas alguns estudos acompanharam a operação desses filtros por períodos superiores a um ano.

A recuperação de fósforo contido no esgoto sanitário através dos FRE é uma alternativa viável economicamente. O benefício não é apenas para as estações de tratamento de esgoto (ETE) que serão capazes de produzir um fertilizante comercial, mas também para as usinas siderúrgicas, vista a grande necessidade do descarte correto das diversas tipologias de escórias produzidas durante a fabricação do aço.

Os resultados mostraram que os FREs possuem uma vida útil dependente da saturação do meio granular com os precipitados de fósforo e também pelo acúmulo de sólidos compostos por matéria orgânica. O tempo de vida útil pode ser alterado em função das características da escória, fundamentalmente pela sua granulometria e pelos parâmetros operacionais submetidos ao filtro, tais como a carga mássica e a carga hidráulica aplicadas ao FRE.

Verificou-se que uma alternativa para a minimização do lançamento dos sólidos com o intuito de aumentar a sua vida útil do FRE, é a instalação de uma tecnologia capaz de reter os sólidos do esgoto antes do mesmo ser lançado no FRE. Nesse caso, os *Wetlands* contruídos são alternativas com um excelente custo benefício e próprio a serem utilizados em regiões descentralizadas.

A interseção entre economia circular, sustentabilidade e a remoção de fósforo do esgoto com escória de aço oferece uma perspectiva promissora na abordagem dos desafios ambientais complexos. Ao adotar uma abordagem circular, utilizando subprodutos industriais como a escória de aço para resolver problemas de poluição hídrica, torna-se possível avançar em direção a sistemas mais sustentáveis e resilientes. Essa prática não apenas contribui para a conservação de recursos naturais, ao fechar o ciclo de materiais, mas também promove a preservação da qualidade da água e dos ecossistemas aquáticos. Além disso, ao integrar princípios de sustentabilidade e engenharia frugal, desenvolve-se soluções eficazes e de baixo custo, que são essenciais para a implementação em larga escala, especialmente em regiões com recursos limitados. Portanto, a combinação desses conceitos oferece uma abordagem holística e inovadora para enfrentar os desafios da poluição hídrica, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável e equitativo.

Alguns desafios de pesquisas futuras envolvem o estudo da reversibilidade das reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução. Há também a necessidade das investigações no ramo da Ciência dos Materiais com a aplicação dos conhecimentos da cristalografia. É necessário estudar as propriedades cristalográficas dos precipitados formados nos FREs com foco nos índices cristalinos dos minerais formados, como os parâmetros de rede e o volume das suas respectivas células unitárias. Que são as características que determinarão a eficiência das aplicações futuras desses precipitados como fontes fosfatadas na agricultura.

Referências bibliográficas

- Ahmad, S. Z. N., Al-Gheethi, A., Hamdan, R., Othman, N. (2020) Efficiencies and mechanisms of steel slag with ferric oxides for removing phosphate from wastewater using a column filter system. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(28), 35184–35194. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09582-7>

- Ahmad, S. Z. N., Hamdan, R., Al-Gheethi, A., Alkhadher, S., Othman, N. (2000) Removal of phosphate from wastewater by steel slag with high calcium oxide column filter system; efficiencies and mechanisms study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **95**(12), 3232–3240. <https://doi.org/10.1002/jctb.6501>
- Albert, M. (2019) Sustainable frugal innovation - The connection between frugal innovation and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, **237**, 117747. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117747>
- Amato Neto, J. (Organizador). (2011) *Sustentabilidade & Produção: Teoria e prática para uma gestão sustentável*, Editora Atlas. Acesso em 22 de outubro de 2023. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7956435/mod_resource/content/1/LIVRO%20SUSTENTABILIDAD%20%20PRODU%C3%87%C3%83O%20ED.ATLAS.pdf. 211pp.
- ANA, Agência Nacional de Águas (2017) *Atlas Esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília. Acesso em: 02 de janeiro de 2023. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASesGOTOSDespoluicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. 92pp.
- Andrade Neto, C. O. (1997) *Simple systems for sanitary sewage treatment: Brazilian experience*. ABES, Rio de Janeiro, RJ, 301 pp.
- Androniceanu A, Kinnunen J, Georgescu I. (2021) Circular economy as a strategic option to promote sustainable economic growth and effective human development. *Journal of International Studies*, **14**(1), 60–73.
- Aria, M., Cuccurullo, C. (2017) Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, **11**(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Arshad, N. A. N. M., Hamdan, R. (2021) Study of Steel Slag Filter Unit as a Secondary Treatment System for Removing Total Phosphorus from Textile Industry Wastewater. *International Journal of Integrated Engineering*, **13**(3), 192–199. <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.03.023>
- Barca, C., Gérante, C., Meyer, D., Chazarenc, F., Andrès, Y. (2012) Phosphate removal from synthetic and real wastewater using steel slags produced in Europe. *Water Res* **46**(7), 2376–2384. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.012>
- Barca, C., Meyer, D., Liira, M., Drissen, P., Comeau, Y., Andrès, Y., Chazarenc, F. (2014) Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants: Removal mechanisms and performance. *Ecological Engineering*, **68**(1), 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.065>
- Barca, C., Troesch, S., Meyerd., Drissen, P., Andrès, Y., Chazarenc, F. (2013) Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in constructed wetlands: Two years of field experiments. *Environmental Science and Technology*, **47**(1), 549–556. <https://doi.org/10.1021/es303778t>
- Barca, C., Roche, N., Troesch, S., Andrès, Y., Chazarenc, F. (2018) Modelling hydrodynamics of horizontal flow steel slag filters designed to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, **206**(1), 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.040>
- Brasil (2011) *Resolução CONAMA nº430, de 13 de maio de 2011*. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União. Brasília.
- Carey, D. E., Yang, Y., McNamara, P. J., Mayer, B. K. (2016) Recovery of agricultural nutrients from biorefineries. *Bioresource Technology*, **215**(1), 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.093>
- Castro, G. S. A., Cruciol, C. A.C., Costa, C. H. M., FERRARI NETO, J., MANCURSO, M. A. C. (2016) Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000034>
- Chand, S., Paul, B., Kumar, M. (2016) A comparative study of physicochemical and mineralogical properties of LD slag from some selected steel plants in India. *Journal of Environmental Science and Technology*, **9**(1), 75–87. <https://doi.org/10.3923/jest.2016.75.87>
- Chen, X., Sun, X., Xu, P., Wang, S., Zhou, T., Wang, X., Yang, C., LU, Q. (2020) Optimal regulation of N/P in horizontal subsurface flow constructed wetland through quantitative phosphorus removal by steel slag fed. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**(1), 5779-5787. <https://doi.org/s11356-019-06696-5>.

- Claveau-mallet, D.; Boutet, É., Comeau, Y. (2018) Steel slag filter design criteria for phosphorus removal from wastewater in decentralized applications. *Water Research*, **143**(1), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.032>
- Claveau-Mallet, D., Comeau, Y. (2020) Chemical Clogging and Evolution of Head Losses in Steel Slag Filters Used for Phosphorus Removal. *Water*, **12**(6), 1517. <https://doi.org/10.3390/w12061517>
- Claveau-Mallet, D., Comeau, Y. (2020) Chemical clogging and evolution of head losses in steel slag filters used for phosphorus removal. *Water (Switzerland)*, **12**(6). <https://doi.org/10.3390/w12061517>
- Claveau-Mallet, D., Courcelles, B., Pasquier, P., Comeau, Y. (2017) Numerical simulations with the P-Hydroslag model to predict phosphorus removal by steel slag filters. *Water Research*, **126**(1), 421-432. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.032>
- Claveau-Mallet, D., Seltani, H., Comeau, Y. (2020) Phosphorus removal and carbon dioxide capture in a pilot conventional septic system upgraded with a sidestream steel slag filter. *Water (Switzerland)*, **12**(1). <https://doi.org/10.3390/w12010275>
- Claveau-Mallet, D., Wallace, S., Comeau, Y. (2011) Model of phosphorus precipitation and crystal formation in electric arc furnace steel slag filters. *Environmental Science and Technology*, **46**(3), 1465–1470. <https://doi.org/10.1021/es2024884>
- Dacach, N. G. (1991) *Tratamento primário de esgoto*. Rio de Janeiro: Didática e Científica, p. 106.
- Dima, A., Bugheanu, A. M., Dinulescu, R., Potcovaru, A. M., Stefanescu, C. A., Marin, I. (2022) Exploring the Research Regarding Frugal Innovation and Business Sustainability through Bibliometric Analysis. *Sustainability*, **14**(3), 1326. <https://doi.org/10.3390/su14031326>
- Drizo, A., Comeau, Y., Forget, C., Chapuis, R. P. (2002) Phosphorus saturation potential: A parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems. *Environ. Sci. Technol.* **36**(21), 4642–4648. <https://doi.org/10.1021/es011502y>
- Dunets, C. S., Zheng, Y., Dixon, M. (2015) Use of phosphorus-sorbing materials to remove phosphate from greenhouse wastewater. *Environmental Technology (United Kingdom)*, **36**(14), 1759–1770. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1009497>
- Ensslin, L., Ensslin, S. R., Lacerda, R. T. O., Tasca, J. E. (2010) ProKnow-C, Knowledge Development Process – Constructivist. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Rio de Janeiro: INPI.
- Ezeudu, O. B., Agunwamba, J. C., Ugochukwu, U. C., Oraelosi, T. C. (2022) Circular economy and frugal innovation: a conceptual nexus. *Environmental Science Pollution Research*. **29**(1), 29719–29734. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18522-6>
- Geissdoefer, M., Savaget, P., Bocker, N.M.P., Hultink, E.J. (2017) The Circular Economy- A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gomes, H. I., Funari, V., Mayes, W. M., Rogerson, M., Prior, T. J. (2018) Recovery of Al, Cr and V from steel slag by bioleaching: Batch and column experiments. *Journal of Environmental Management*, **222**(1), 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.056>
- Gonzalez, J. M., Penn, C. J., Livingston, S. J. (2020) Utilization of Steel Slag in Blind Inlets for Dissolved Phosphorus Removal. *Water*, **12**(6), 1593. <https://doi.org/10.3390/w12061593>
- Hamdan, R., Arshad, N. A. N. M., Ahmad, S. Z. N. (2018) The effects of PO_4^{3-} removal from aqueous solution with varied concentrations of metal oxides in steel slag filter system. *Journal of Physical Science*, **29**(1), 71–80. <https://doi.org/10.21315/jps2018.29.s3.9>
- Hukari, S., Hermann, L., Nättorp, A. (2016) From wastewater to fertilisers - Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling. *Science of the Total Environment*, **542**(1), 1127–1135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.064>
- Kahle, H.N., Anna, D., Ernst, P., Prabhu, J. (2013) The democratizing effects of frugal innovation: Implications for inclusive growth and state-building. *J. Indian Bus. Res.*, **5**(1), 220–234.

- Kim, B. C., Kim, M., Choi, Y., Nam, K. (2018) Effect of basic oxygen furnace slag addition on enhanced alkaline sludge fermentation and simultaneous phosphate removal. *Journal of Environmental Management*, **239**(1), 66–72, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.043>
- Kuwahara, Y., Yamashita, H. (2017) Phosphate removal from aqueous solutions using calcium silicate hydrate prepared from blast furnace slag. *ISIJ International*, **57**(9), 1657–1664. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-123>
- Kwon, G., Kang, J., Nam, J., Kim, Y., Jahng, D. (2019) Struvite production from anaerobic digestate of piggery wastewater using ferronickel slag as a magnesium source. *Environmental Technology (United Kingdom)*, **42**(3), 429–443. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1631390>
- Liu, M., Liu, X., Wang, W., Guo, J. (2020) Phosphorus removal from wastewater using electric arc furnace slag aggregate, *Environmental Technology*. **43**(1), 1–26. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1774664>
- Liu, X., Yuan, L., YuaN, Y., Liu, S. (2019) Phosphorus removal from wastewater by steel slag ceramsite filter. *Nature Environment and Pollution Technology*, **18**(2), 579–585 ISSN: 2395-3454.
- Lu, H., Xiao, L., Wang, T., Lu, S., Wang, H., Guo, X., Li, J. (2021) The application of steel slag in a multistage pond constructed wetland to purify low-phosphorus polluted river water. *Journal of Environmental Management*, **292**(9)(112578). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112578>
- Mahler, R. L. Nutrients plants require for growth. CIS 1124, College of Agriculture and Life Sciences, University of Idaho. Accesso em: 10/04/2022. Disponível em: <https://www.extension.uidaho.edu.publishing/pdf/CIS/CIS1124.pdf>
- Medeiros, D. L., Queiroz, L. M., Cohim, E., Almeida-Neto, J. A., Kiperstok, A. (2020) Human urine fertiliser in the Brazilian semi-arid: Environmental assessment and water-energy-nutrient nexus. *Science of the Total Environment*, **713**(1), 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136145>
- Molina-MaturanO, J., Bucher, J., Speelman, S. (2020) Understanding and evaluating the sustainability of frugal water innovations in México: An exploratory case study. *Journal of Cleaner Production*, **274**(1). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122692>
- Montalvo, D., McLaughlin, M. J., Degryse, F. (2015) Efficacy of Hydroxyapatite Nanoparticles as Phosphorus Fertilizer in Andisols and Oxisols. *Soil Fertility & Plant Nutrition*, **79**(1), 551–558. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.09.0373>
- Nedelciu, C. E., Ragnarsdottir, K. V., Schlyter, P., Stjernquist, I. (2020) Global phosphorus supply chain dynamics: Assessing regional impact to 2050. *Global Food Security*, **26**(1). <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100426>.
- Osaki, M. (2022) After a month, Russia-Ukraine war still concerns the fertilizer sector. CEPEA - Center for Advanced Studies on Applied Economics. Accesso em: 09/04/2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/en/opinion/after-a-month-russia-ukraine-war-still-concerns-the-fertilizer-sector.aspx>
- Osório, V. K. L., Oliveira, W. (2001) Polyphosphates in commercial powder detergents. *Química Nova*, **24**(5). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000500019>
- Pacheco, J. E., Pessôa, Arruda, C. (2011) *Tratamento de esgotos domésticos*. 6 ed. ABES, Rio de Janeiro, 1050 pp.
- Paiva, R. F. Da P. De S., De Souza, M. F. DA P. (2018) Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e a morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil. *Cadernos de Saude Pública*, **34**(1), 1–11. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00017316>
- Park, T., Ampunan, V., Maeng, S., Chung, E. (2017) Application of steel slag coated with sodium hydroxide to enhance precipitation-coagulation for phosphorus removal. *Chemosphere*, **167**(1), 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.150>
- Pramanik, B. K., Islam, M. A., Asif, M. B., Roychand, R., Pramanik, S. K., Shah, K., Bhuiyan, M., Hai, F. (2020) Emerging investigator series: Phosphorus recovery from municipal wastewater by adsorption on steelmaking slag preceding forward osmosis: An integrated process. *Environmental Science: Water Research and Technology*, **6**(6), 1559–1567. <https://doi.org/10.1039/d0ew90029j>

- Prasad, R. (2009) Efficient fertilizer use: The key to food security and better environment. *Journal of Tropical Agriculture*, **47**(1), 1–17 Accesso em: 19/05/2022. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/267261093_Efficient_fertilizer_use_The_key_to_food_security_and_better_environment
- Prosab. (2009) *Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção*. Francisco Suetônio Bastos Mota e Marcos von Sperling (coordenadores) e outros (29 autores). ABES, Rio de Janeiro. 428 pp. ISBN: 978-85-7022-164-3.
- Qteishat, O., Myszograj, S., Suchowska-Kisielewicz, M. (2011) Changes of wastewater characteristic during transport in sewers. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, **7**(1). Accesso em: 27/02/2022. Disponível em: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/environment/2011/54-608.pdf>
- Ragnarsdottir, K. V., Sverdrup, H. U., Koca, D. (2011) Challenging the planetary boundaries I: Basic principles of an integrated model for phosphorous supply dynamics and global population size. *Applied Geochemistry*, **26**(1), 303–S306. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.088>
- Shen, D. H., Wu, C. M., Du, J. C. (2009) Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, **23**(1), 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- Simpson, E. Ukraine war 'catastrophic for global food'. Business correspondent, BBC News. 7 de março de 2022. Accesso em: 01/04/2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/business-60623941>
- Sun, S., Feng, C., Tong, S., Zhao, Y., Chen, N., Zhu, M. (2021) Evaluation of advanced phosphorus removal from slaughterhouse wastewater using industrial waste-based adsorbents. *Water Science and Technology*, **83**(6), 1407–1417. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.069>
- Sun, S., Gao, M., Wang, Y., Qio, Q.; Han, J.; Qio, L.; Feng, Y. (2021) Phosphate removal via biological process coupling with hydroxyapatite crystallization in alternating anaerobic/aerobic biofilter reactor. *Bioresource Technology*, **326**(1). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124728>
- Tawfik, A., Bakr, M. H., Nasr, M., Haider, J., Mesfer, M. K. AL., Lim, H., Qyyum, M. A., Lam, S. S. (2022) Economic and environmental sustainability for anaerobic biological treatment of wastewater from paper and cardboard manufacturing industry. *Chemosphere*, **289**(1). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133166>
- Valsami-Jones E. (2001) Mineralogical controls on phosphorus recovery from wastewaters. *Mineral Mag*, **65**(5):10.
- Viegas, C. V., Bond, A. J., Vaz, C. R., BORCHARDT, M., PEREIRA, G. M., SELIG, P. M., VARAVAKIS, G. (2016) Critical attributes of Sustainability in Higher Education: a categorisation from literature review. *Journal of Cleaner Production*, **126**(1), 260-276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.106>
- Vu, M. T., Duong, H. C., Wang, Q., Ansari, A., Xai, Z., Hoang, N. B., Nghiem, L D. (2023) Recent technological developments and challenges for phosphorus removal and recovery toward a circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, **30**(May 2023), 1031141. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103114>
- Vu, M. T., Nguyen, L. N., Johir, M. A. H., Ngo, H. H., Skidmore, C., Fontana, A., Galway, B., Bustamante, H., Nghiem, L. D. (2021) Phosphorus removal from aqueous solution by steel making slag – Mechanisms and performance optimisation. *Journal of Cleaner Production*, **284**(February 2021) 124753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124753>
- Wang, G., Gao, J., Yang, R., Zhang, J., Guo, H., Gao, J. (2019) Preparation of sustainable non-combustion filler substrate from waterworks sludge/aluminum slag/gypsum/silica/maifan stone for phosphorus immobilization in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, **80**(1), 153–163. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.258>
- Westholm, L. J. (2006) Substrates for phosphorus removal - Potential benefits for on-site wastewater treatment? *Water Research*, **40**(2), 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.006>
- Xu, R. Zhang.; Liu. Rong. Cao, Y. Wang, G. Ji, L. Xu, Y. (2019) Effects of different substrates on nitrogen and phosphorus removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**(16), 16229–16238. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04945-1>
- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., Chen, H. (2012) An Overview of Utilization of Steel Slag. *Procedia Environmental Sciences*, **16**(3), 791–801. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>

Yildirim, I. Z., Prezzi, M. (2011) Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*. **2011**(1), 463638. <https://doi.org/10.1155/2011/463638>

Yousaf, Z., Panait, M., Tanveer, U., Cretu, A., Hrebenciuc, A., Zahid, S. M. (2022) Value Creation through Frugal Innovation, Innovation Capability and Knowledge Sharing in a Circular Economy. *Sustainability*, **14**(14), 8504. <https://doi.org/10.3390/su14148504>

Yuan, Z., Fu, S., Xu, X., Wendling, L. A. (2017) Mineral Processing Residue Use as Substrate in a Modular Engineered Wetland for Wastewater Treatment. *Environmental Processes*, **4**(3), 523–547. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0247-6>

Zancheta, P. G. (2007) *Recuperação e tratamento da urina humana para uso agrícola*, Dissertação Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 83 pp.

Zuo, M., Renman, G., Gustafsson, J. P., Klysubun, W. (2018) Dual slag filters for enhanced phosphorus removal from domestic wastewater: performance and mechanisms. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(8), 7391-7400. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0925-y>