



ISSN: 2525-815X

# Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: [www.jeap.ufrpe.br/](http://www.jeap.ufrpe.br/)

10.24221/jeap.8.3.2023.5809.156-171



## Uso de resíduos de conchas de moluscos no tratamento de águas residuais: uma revisão sobre processos e potencialidades

### Use of mollusk shell residues in wastewater treatment: a review of processes and potentialities

Vinícios Freitas Silva<sup>a</sup>, Janssen Júlio Rodrigues<sup>a</sup>, Bruno e Silva Ursulino<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto Federal de Educação-IFPE, Ciência e Tecnologia do Ceará-IFCE, Departamento de Recursos Naturais, Engenharia de Aquicultura, Campus Aracati. Rodovia CE-040, Km 137, S/N, Bairro Aeroporto, Aracati, Ceará, Brasil. CEP 62800-000. E-mail: [fvinicios798@gmail.com](mailto:fvinicios798@gmail.com), [janssenjulio@gmail.com](mailto:janssenjulio@gmail.com), [bruno.ursulino@ifce.edu.br](mailto:bruno.ursulino@ifce.edu.br).

#### ARTICLE INFO

Recebido 14 Mai 2023

Aceito 15 Jun 2023

Publicado 10 Jul 2023

#### ABSTRACT

Shell fishing is an important activity for riverside communities around the world, contributing to family income generation, healthy food production, and local economic development. However, this activity promotes various types of impacts, especially in relation to the leftover shells after processing. Large amounts of solid waste are generated and disposed of incorrectly in most cases. Due to their composition, shells can be applied in several areas, and, in recent years, the scientific community has evaluated their use in the effluent's bioremediation. In this regard, the study aimed to review the use of mollusk shell residues as a substrate for wastewater treatment, providing an overview of the composition of the materials, the processes applied, and the full potential for reuse. or proper disposal of such waste. The review was carried out by searching for articles and other works from the Scopus, Web of Science, and Science Direct databases. The results obtained show a diversity of treatment processes with different efficiencies for removing compounds in raw, synthetic, and treated effluents. Findings regarding the adsorption efficiency of phosphate compounds proved to be highly promising, since most authors, even using different conditions, obtained high removal rates. In addition to the aspects related to the applied physical and chemical processes, the authors also emphasized the economic viability and the mitigation of impacts in the incorrect disposal of these materials.

**Keywords:** Bivalve mollusks shell, natural substrate, adsorption, phosphate.

#### RESUMO

A pesca de mariscos é uma atividade de grande relevância para comunidades ribeirinhas por todo o mundo, contribuindo para a geração de renda familiar, produção de alimento saudável e para o desenvolvimento econômico local. Contudo, muitos impactos são resultantes dessa atividade, devido a sobra das conchas depois do beneficiamento, onde são geradas grandes quantidades de resíduos sólidos que, na maioria das vezes, são descartados incorretamente. Devido à sua composição, as conchas podem ser aplicadas em diversas áreas e, nos últimos anos, a comunidade científica tem avaliado o seu uso na biorremediação de efluentes. Nesse aspecto, o estudo objetivou realizar uma revisão sobre a utilização de resíduos de conchas de moluscos como substrato para o tratamento de águas residuais, fornecendo uma visão geral sobre a composição dos materiais, dos processos aplicados e de toda a potencialidade de reutilização ou descarte adequado desses resíduos. A revisão foi realizada buscando artigos e demais estudos provenientes das bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*. Os resultados obtidos apresentam uma diversidade de processos de tratamentos com diferentes valores de eficiências de remoção de compostos em efluentes brutos, sintéticos e tratados. Constatações a respeito da eficiência de adsorção de compostos fosfatados se mostraram fortemente



promissoras, uma vez que, a grande maioria dos autores, mesmo utilizando-se de condições diferentes, obtiveram altas taxas de remoção. Além dos aspectos voltados aos processos físicos e químicos aplicados, os autores também enfatizaram a viabilidade econômica e à mitigação dos impactos no descarte incorreto desses materiais.

**Palavras-Chave:** Concha de moluscos bivalves, substrato natural, adsorção, fosfato.

## Introdução

A pesca de mariscos é uma atividade de grande relevância para comunidades ribeirinhas por todo o mundo, contribuindo para a geração de renda familiar, produção de alimento saudável e principalmente contribuindo para o desenvolvimento econômico dessas localidades. Em países que possuem vasto litoral, estas atividades têm ganhado importância para fornecimento de proteína animal, devido aos baixos custos e alta rentabilidade proporcionada (Vieira, Coelho & Jesus, 2019). Contudo, assim como todas as atividades humanas que fazem uso do meio ambiente, muitos impactos são resultantes da realização dessa atividade, que ocorre principalmente na parte final de sua produção, quando os animais são beneficiados e tem o seu conteúdo interno retirado de sua concha, gerando uma grande quantidade de resíduos sólidos que, em grande parte, são descartados ilegalmente em locais como mangues, aterros ou até mesmo em áreas urbanas (Li et al., 2012; Fagundes & Silva, 2022; Liao et al., 2023).

Muitos são os problemas ambientais resultantes do descarte inadequado das conchas de ostras e mexilhões. No solo, além da calcificação, a decomposição da matéria orgânica produz poluentes gasosos como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e gases de hidrocarbonetos, com odor e toxicidade perigosos para a saúde humana (Li et al., 2012). Quando empilhados em terrenos baldios, esses resíduos atraem mosquitos, moscas e ratos, tornando-se o local ideal para a desova e reprodução desses animais (Li et al., 2012; Liao et al., 2023). Quando as conchas de ostras e outros resíduos são descartados na água, causam poluição e infectam organismos aquáticos, resultando em impactos significativos na qualidade da água (Cheng et al., 2023).

O conhecimento das características estruturais e químicas desses resíduos pode auxiliar no gerenciamento adequado, tanto na possibilidade de reaproveitamento, tal como em processos alternativos de tratamento de efluentes, quanto na disposição final adequada das conchas (Park & Polprasert, 2008; Nguyen et al., 2020; Pap et al., 2022).

Globalmente, as conchas marinhas podem ser recicladas para vários propósitos, como materiais de construção, aditivos para ração

animal, osso artificial e catalisadores para produção de biodiesel, agentes bactericidas, agentes de desalogenação, limpeza de gases ácidos, adsorventes de baixo custo e como fertilizantes (Yao et al., 2014; Salim et al., 2022b). Além disso, esses resíduos apresentam características de interesse, especialmente o poder calorífico, pH, composição química, em especial o nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e carbono, relação carbono/nitrogênio, sólidos totais fixos, sólidos voláteis e teor de umidade.

De acordo com Nguyen et al. (2020), a utilização de conchas na biorremediação de efluentes, como potenciais adsorventes de fósforo, tem chamado muita atenção. Nadeem (2018) relata que esse mérito é devido ao conteúdo abundante de carbonato de cálcio, a ausência de toxicidade e a capacidade corretiva de solos ricos em fósforo. Segundo Kwon et al. (2004), a eficiência em relação a remoção de fósforo é potencializada apenas quando as conchas de ostras são submetidas a altas temperaturas, chegando a valores de remoção de até 98%. Os autores ainda relatam a redução de custos ao utilizar o pó de ostra pirolisado, quando comparado com a aquisição de produtos químicos para o tratamento de concentrações elevadas de fósforo em efluentes.

Diante do exposto, este estudo objetivou investigar, por meio de uma revisão bibliográfica, a utilização de resíduos de conchas de moluscos em sistemas de tratamento de efluentes, fornecendo uma visão geral sobre a composição dos materiais, os processos aplicados e a potencialidade de reutilização desses resíduos.

## Material e Métodos

A pesquisa foi realizada buscando artigos científicos e demais estudos relevantes, provenientes das bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*. Como critérios para a busca, foram considerados apenas estudos revisados por pares e publicados entre 2000 e 2023. A seleção de literatura foi realizada por meio de combinações de *Strings* no título, resumo e palavras-chave dos artigos, como por exemplo: *mussel shell*, *shell*, *oyster shell*, *oyster*, *phosphate precipitation*, *phosphorus precipitation*, *phosphate removal*, *phosphorus removal*, *wastewater treatment*, *effluent treatment* (Tabela 1). Nas duas primeiras bases citadas, foi utilizado o asterisco (\*)

para facilitar a procura de palavras singulares, plurais e afins. A base *Science Direct* não permite a utilização deste recurso, portanto, houve a necessidade da criação de uma nova *String* para que esta restrição não limitasse a pesquisa dos artigos. Além disso, foi necessária a redução de *Strings* de busca ao usar a base *Science Direct*, pois esta permite apenas oito conectores booleanos por campo de busca. As *Strings* de busca configuradas para cada uma das bases de dados foram representadas na Tabela 1.

Tabela 1. *Strings* de busca utilizados por base de dados. Fonte: Silva, Rodrigues & Ursulino (2023).

| Base de dados           | Estratégia de busca ( <i>strings</i> )                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Scopus e Web of Science | ("mussel shell*" OR "shell*" OR "oyster shell*" OR "oyster"), AND ("phosphate precipitation" OR "phosphorus precipitation" OR "phosphate removal" OR "phosphorus removal"), AND ("Wastewater treatment*" OR "effluent treatment*") |

|                       |                                                                                                                                                                  |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Science Direct</i> | ("mussel shell" OR "oyster shell" OR "oyster") AND ("phosphate" OR "phosphorus" OR "phosphate removal" OR "phosphorus removal") AND ("Wastewater" OR "effluent") |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

A seleção dos manuscritos foi realizada, inicialmente, a partir da leitura dos títulos, palavras-chave e resumos. Ademais, os resultados encontrados foram submetidos a alguns critérios de exclusão, para que fossem avaliados apenas os artigos em conformidade com o tema de interesse.

De acordo com esses critérios, foram excluídos os artigos que não tinham o título alinhado ao tema e/ou que o resumo não apresentasse informações relevantes para a pesquisa, e/ou que não foram avaliados a eficiência de remoção de parâmetros de qualidade do efluente, a partir da aplicação dos resíduos de ostra como substrato. A Figura 1 ilustra o fluxograma para a seleção dos artigos com os critérios de inclusão e exclusão.



Figura 1. Critérios para inclusão ou exclusão dos manuscritos. Fonte: Adaptado de Santos, Lima & Michelin (2021).

### Resultados e Discussão

As buscas iniciais resultaram em 119 publicações encontradas, sendo 48 na base *Scopus*, 52 na *Web of Science* e 19 na *Science Direct*. Entre essas publicações, foram identificados 53 artigos únicos, encontrados em pelo menos uma das três plataformas. Após a aplicação dos critérios de exclusão e a leitura dos 53 artigos, apenas 28 foram considerados em conformidade com a temática. Dentre esses, 17 foram provenientes da base *Scopus*, 16 da *Web of Science* e 11 da *Science Direct*. A Figura 2 apresenta os resultados quantitativos referentes ao número de artigos encontrados por base, considerando as repetições.

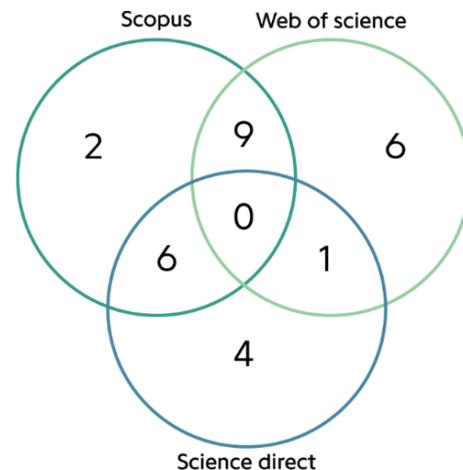


Figura 2. Número de artigos encontrados nas bases de pesquisa. Fonte: Silva, Rodrigues & Ursulino (2023).



|                                                                                                                                                                                                      |                                                   |                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 12. Phosphate Sorption in Shellfish Shell ( <i>Venerupis pulestra</i> ) Substrates: Development of Green and Low-Cost Technology for Tertiary Treatment of Effluents                                 | Vieira, B.; Coelho, L. H. G.; Jesus, T. A. (2019) | Journal of Environmental Engineering                    |
| 13. Preparation, optimization, and application of sustainable ceramsite substrate from coal fly ash/waterworks sludge/oyster shell for phosphorus immobilization in constructed wetlands             | Cheng, G. et al. (2018)                           | Journal of Cleaner Production                           |
| 14. White hard clam ( <i>Meretrix lyrata</i> ) shells media to improve phosphorus removal in lab-scale horizontal sub-surface flow constructed wetlands: Performance, removal pathways, and lifespan | Nguyen, T. A. H. et al. (2020)                    | Bioresource Technology                                  |
| 15. Phosphate removal from wastewater in batch system using waste mussel shell                                                                                                                       | Salim, N. A. A. et al. (2021a)                    | Biointerface Research in Applied Chemistry              |
| 16. Zebra mussel shells as an alternative mineral resource for lime production as a phosphorus precipitant                                                                                           | McCorquodale-Bauer, K.; Cicek, N. (2020)          | Environmental Technology                                |
| 17. Enhanced phosphate removal and potential recovery from wastewater by thermo-chemically calcinated shell adsorbents                                                                               | Pap, S. et al. (2022)                             | Science of the Total Environment                        |
| <b>Web of Science</b>                                                                                                                                                                                |                                                   |                                                         |
| 18. Equilibrium and Kinetic Studies of Phosphate Removal from Solution onto a Hydrothermally Modified Oyster Shell Material                                                                          | Chen, J. et al. (2013)                            | Plos One                                                |
| 19. Use of marine and engineered materials for the removal of phosphorus from secondary effluent                                                                                                     | Zapater-Pereyra, M. et al. (2014)                 | Ecological Engineering                                  |
| 20. Investigation of Sorbents for Phosphorus Removal                                                                                                                                                 | Šarko, J. & Mažeikienė, A. (2020)                 | 11th International Conference Environmental Engineering |
| 21. Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution onto Iron-coated Waste Mussel Shell: Physicochemical Characteristics, Kinetic, and Isotherm Studies                                                | Salim, N. A. A. et al. (2021b)                    | Biointerface Research in Applied Chemistry              |
| 22. Phosphate Adsorption from Synthetic Aqueous Solutions by Waste Mussel Shell: Kinetics and Isotherms Studies                                                                                      | Abdullah, N. H. et al. (2021)                     | International Journal of Nanoelectronics and Materials  |
| 23. Mass Transfer Kinetics and Mechanisms of Phosphate Adsorbed on Waste Mussel Shell                                                                                                                | Salim, N. A. A. et al. (2022a)                    | Water air And Soil Pollution                            |
| 24. A Two-Stage Batch System for Phosphate Removal from Wastewater by Iron-Coated Waste Mussel Shell to Assess the Optimum Adsorbent Dosage                                                          | Salim, N. A. A. et al. (2022b)                    | Journal of Water Chemistry and Technology               |
| 25. Removal of Phosphate from Synthetic Wastewater by Using Marsh Clam ( <i>Polymesoda expansa</i> ) Shell as an Adsorbent                                                                           | Abdullah, N. H. et al. (2023)                     | Biointerface Research in Applied Chemistry              |
| <b>Science Direct</b>                                                                                                                                                                                |                                                   |                                                         |
| 26. Recycling waste oyster shells for eutrophication control                                                                                                                                         | Kwon, H. B. et al. (2004)                         | Resources, Conservation and Recycling                   |
| 27. Roles of oyster shells in an integrated constructed wetland system designed for P removal                                                                                                        | Park & Polprasert (2008)                          | Ecological Engineering                                  |
| 28. Study of municipal wastewater treatment with oyster shell as biological aerated filter medium                                                                                                    | Liu et al. (2010)                                 | Desalination                                            |

A Figura 4 apresenta a quantidade de publicações realizadas a cada ano, de modo que é evidente uma quantidade constante de publicações ao longo do intervalo de tempo pesquisado e, ao mesmo tempo, demonstra o baixo número de artigos com o foco na temática. Destaca-se o ano de 2010, com o maior número de publicações, seguido do ano de 2013, com quatro artigos, e anos com um total de três estudos publicados (2020, 2021 e 2022). A ausência de artigos nos anos iniciais (2000 a 2003 e 2005 a 2007) pode ser explicada em razão da primeira publicação encontrada, após

requisitos de inclusão e exclusão, referir-se ao artigo de Kwon et al. (2004), publicado apenas em 10 de fevereiro de 2004. Isso pode indicar que, mesmo que a busca não tenha contemplado uma série anterior mais abrangente e outras plataformas de dados, é possível que os métodos analisados tenham sido estudados há pouco tempo.

Apesar de haver anos mais atuais com ausência de publicações (2015 e 2017), ao analisar a Figura 4, percebe-se que o número de investigações sobre o tema vem aumentando ao longo dos anos.

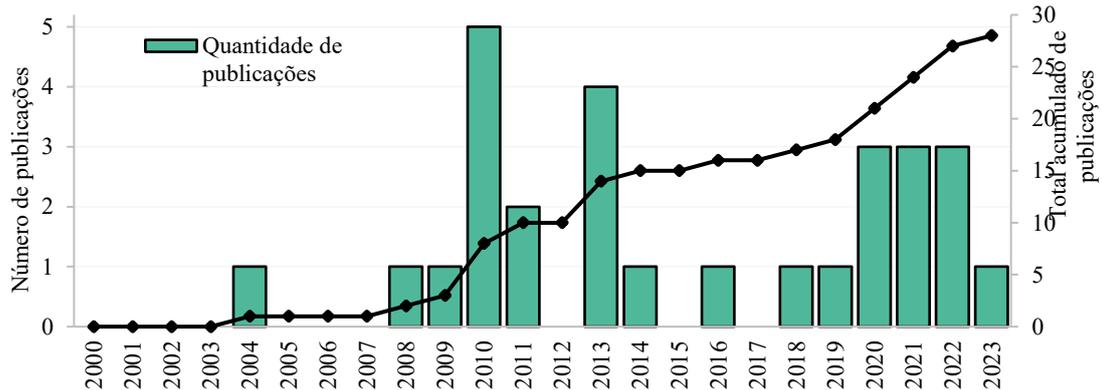


Figura 4. Evolução da quantidade de publicações encontradas por ano. Fonte: Silva, Rodrigues & Ursulino (2023).

Os países em que foram realizadas as publicações presentes neste artigo são representados na Figura 5. Nota-se a baixa variedade de países em que foram publicados artigos sobre o tema, apenas 12 países são representados na Figura 5. Quanto a predominância das pesquisas por continente, verifica-se que o maior número foi encontra-se na Ásia, com um total de vinte artigos, seguido de quatro no continente europeu, dois na Oceania, um no continente norte americano e um no sul-americano. Não obstante, o país que concentra a maior quantidade de estudos é a China (35,7%), seguida

pela Malásia (21,4%), Coreia do Sul e Nova Zelândia com duas publicações cada (7,1%). Os demais países apresentaram apenas uma publicação. A ocorrência de conchas de moluscos, naturalmente encontradas nos litorais continentais, pode explicar a ampla distribuição espacial dos estudos nos países em destaque. A predominância de artigos no continente asiático pode estar associada ao crescente desenvolvimento da aquicultura de mariscos e das indústrias de conservas na região (Barros et al., 2009; Vieira, Coelho & Jesus, 2019).



Figura 5. Distribuição geográfica dos artigos publicados sobre o tema. Fonte: Silva, Rodrigues & Ursulino (2023).

Os estudos foram publicados em um total de 22 periódicos, como mostra a Figura 6, sendo

esses distribuídos em áreas como a engenharia, principalmente ecológica, ambiental, química e

química ambiental. Os estudos foram publicados em periódicos voltados à tecnologia ambiental, da água e de biorrecursos, bem como naqueles que envolvem a gestão oceânica, costeira, recursos naturais, conservação e reciclagem etc. Periódicos cujos temas são o estudo de materiais, síntese, análise de propriedades, tecnologias de processamento de materiais e seu uso na fabricação, também estão presentes nesta revisão, embora que em um número menos expressivo. Em síntese, o periódico *Ecological Engineering*

apresentou o maior número de publicações, com o total de cinco artigos publicados, seguido da *Biointerface Research in Applied Chemistry*, com três artigos, e o evento *Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental Technology and Knowledge Transfer*, com duas publicações. Os outros 17 periódicos apresentaram apenas uma publicação cada, demonstrando a multidisciplinaridade e abrangência dos temas que envolvem a utilização destes materiais.

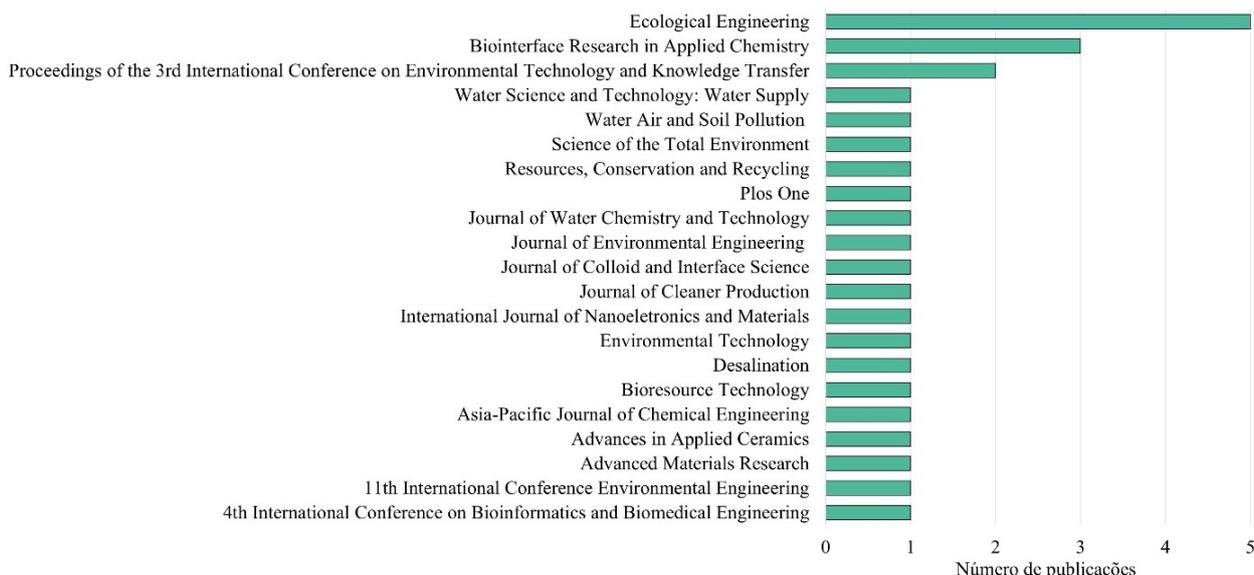


Figura 6. Quantidade de publicações por periódicos e eventos. Fonte: Silva, Rodrigues & Ursulino (2023).

Todos os artigos selecionados foram analisados integralmente e as suas informações de interesse para o assunto, tais como: o objetivo da pesquisa, a espécie na qual utilizaram as conchas, tamanho das partículas, o local de estudo, as variáveis analisadas para testar a remoção, o tipo de amostra submetida ao tratamento e, finalmente, os resultados da eficiência alcançados através dos métodos aplicados foram examinados, selecionados e sintetizados na Tabela 3.

Observando o tema de investigação dos autores, é possível sintetizar suas finalidades em algumas formas principais de reutilização dos resíduos de conchas de moluscos, como empregá-los sozinhos, a fim de testar sua capacidade de remoção de compostos fosfatados, visando a biorremediação de efluentes, sendo esse o objetivo mais recorrente entre os artigos (Kwon et al., 2004; Park & Polprasert, 2008; Paradelo et al., 2016; Vieira, Coelho & Jesus, 2019; Pap et al., 2022). Outro ponto observado é a utilização desses resíduos, juntamente com outros materiais, por vezes com o intuito de comparar a potencialidade de tratamento, utilizando tipos diferentes de substratos, visando a otimização dos resultados (Park, 2009; Wang et al., 2013b; Zapater-Pereyra

et al., 2014; Cheng et al., 2018; Salim et al., 2022a). Há, também, investigações sobre os mecanismos que envolvem a remoção de nutrientes em águas residuárias, principalmente com foco na redução das concentrações de compostos nitrogenados e fosfatados (Park, 2009), e incluindo também variáveis como a DBO, DQO e SST (Cui, Liu & Wang, 2010; Cui, Tong & Zhao, 2010; Li et al., 2010; Salim et al., 2022a). Outros autores avaliaram as possibilidades de melhoria de desempenho de tratamento empregando substrato composto por resíduos de conchas em diferentes arranjos nas etapas de tratamentos (pré e pós filtro) (Park, 2009; Park & Polprasert, 2008). Essas aplicações utilizaram sistemas descentralizados de tratamento de efluentes do tipo *wetlands* construídos, que é objeto de estudo em muitas outras publicações (Wang et al., 2013a; Cheng et al., 2018; Nguyen et al., 2020; Zapater-Pereyra et al., 2014). Também foram investigados a influência da concentração inicial, a tempo de contato e a cinética de adsorção dos compostos fosfatados com a aplicação de modelos cinéticos e isotérmicos (Paradelo et al., 2016, Pap et al., 2022; Chen et al., 2013; Salim et al., 2022ab; Abdullah, 2023).

Tabela 3. Principais informações extraídas dos artigos utilizados na revisão. Fonte: Silva, Rodrigues &amp; Ursulino (2023).

| Tema da investigação                                                                                                                                                                                                                                                  | Espécie                                                | Tamanho das partículas                                                 | Variáveis Analisadas                                                                                                                      | Amostra submetida ao tratamento                                                                             | Principais resultados de eficiência de remoção                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuais domésticas aplicando um sistema integrado e alternado de unidades com pré e pós filtro (com lodo de alumínio como filtro) e um <i>wetland</i> construído (com conchas de ostras como meio filtrante), em série. | -                                                      | 0,6 a 1,3 mm                                                           | Taxa de remoção de N (nitrogênio) e P (fósforo).                                                                                          | Águas residuais enriquecidas com $\text{KH}_2\text{PO}_4$ em concentrações de P de 10–27 $\text{mg L}^{-1}$ | Pré-filtro → <i>Wetland</i> (P = 99,4%; N = 68,8%)<br><i>Wetland</i> → Pós-filtro (P = 99,7%; N = 86,8%)                                                                                                                                                                                               |
| 2. Otimização do processo de conversão de resíduos de conchas da indústria de mariscos em cal para utilizá-los na remoção de fosfato de águas residuais.                                                                                                              | Mexilhão de lábios verdes ( <i>Perna canaliculus</i> ) | 53 a 106 $\mu\text{m}$ (pó fino) e 212 a 250 $\mu\text{m}$ (pó grosso) | Variação das condições de pirólise; tamanho das partículas; concentração da casca na remoção de fosfato.                                  | Efluente sintético (solução de ortofosfato 10 $\text{mg PO}_4 \text{L}^{-1}$ )                              | > 95% de remoção de fosfato, independentemente do tamanho da partícula ou das condições de pirólise (750 e 800°C).                                                                                                                                                                                     |
| 3. Investigação sobre o ajuste de pH e eficiência de remoção de fósforo utilizando resíduos de conchas em reator acidogênico no tratamento de efluentes domésticos.                                                                                                   | -                                                      | -                                                                      | Variação do pH, demanda química de oxigênio (DQO) e a eficiência de remoção do fósforo total (PT).                                        | Efluente doméstico da ETE local                                                                             | Na partida do reator a remoção de PT foi de 9.1%, com tempo de detenção de 4h, foi de 17%, após tempo de 8h, foi de 26% e com tempo de detenção hidráulico de 12 h, a remoção foi de 27.4%.                                                                                                            |
| 4. Produção de material com alta capacidade de sorção, prontamente coletado e com capacidade sustentável para remoção de fosfato, usando pó de sílica pirogênica e casca de ostra pulverizada.                                                                        | -                                                      | casca de ostra pulverizada < 0,074 mm e pó de sílica                   | Efeitos de diferentes temperaturas de calcinação; temperaturas de recozimento hidrotérmico e tempos de recozimento na remoção de fosfato. | Efluente sintético (solução de ortofosfato 5 $\text{mg PO}_4^{2-} \text{L}^{-1}$ )                          | Condições ótimas (74% ou 92% de remoção de fosfato) obtidas com calcinação a 800°C e recozimento hidrotérmico a 150°C por 12 h.                                                                                                                                                                        |
| 5. Apresentação de resultados de remoção de matéria orgânica e fósforo em esgoto doméstico tratado utilizando um reator biológico aerado de fluxo ascendente com conchas de ostras como substrato.                                                                    | -                                                      | 5 cm                                                                   | Taxa de remoção média da DQO e do PT sob condições de tempo de detenção hidráulica.                                                       | Água residual sintética                                                                                     | Remoção de PT de 36,1%, 37,0% e 42,7% com tempo de detenção hidráulica de 4 h, 8 h e 12 h, respectivamente.                                                                                                                                                                                            |
| 6. Investigação sobre o emprego de conchas de ostra no pré-tratamento de esgoto doméstico.                                                                                                                                                                            | -                                                      | 5 cm                                                                   | Taxa de remoção média da DQO e do PT sob condições de tempo de retenção hidráulica.                                                       | Água residual sintética                                                                                     | Remoção de 17%, 26% e 27,4% das de PT com tempo de detenção hidráulica de 4 h, 8 h e 12 h                                                                                                                                                                                                              |
| 7. Otimização de calcinação para conversão de casca crua de mexilhão, uma rica fonte de carbonato de cálcio, em uma forma de cal ( $\text{CaO}$ ) adequada para a remoção de fosfato.                                                                                 | Mexilhão de lábios verdes ( <i>Perna canaliculus</i> ) | 0 a 53 mm e 53 a 106 mm                                                | Tamanho de partícula; temperatura; taxa de aquecimento; tempo de tratamento (remoção fosfato).                                            | Solução de ortofosfato (10 $\text{mg PO}_4 \text{L}^{-1}$ )                                                 | Conchas de cruas: 20–30% de remoção de fosfato, com maiores eficiências quando utilizados os menores tamanhos de partículas; tratadas sob aquecimento (800°C): > 90%                                                                                                                                   |
| 8. Utilização de quatro substratos (conchas de ostra, tijolos quebrados e minerais vulcânicos e zeólitos) armazenados em colunas de fluxo vertical para verificar o desempenho de remoção de fósforo em efluentes suínos de tanque anaeróbio.                         | -                                                      | < 2 mm                                                                 | Avaliação físico-química dos substratos; capacidade de adsorção e remoção de fósforo total e fósforo reativo solúvel.                     | Soluções de fósforo em concentrações de 6 a 80 $\text{mg P L}^{-1}$                                         | Tempo de retenção hidráulico de 0,02 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \cdot \text{d}$ = 95,88% de remoção de fósforo reativo solúvel e 96,80% de fósforo total; Tempo de retenção hidráulico de 0,06 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \cdot \text{d}$ = 87,76% de fósforo reativo solúvel e 87,96% de fósforo total; |

|                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                   |                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9. Investigação sobre o potencial de conchas de ostras como substrato de adsorção de fósforo em <i>wetlands</i> construídos.                                                                                                                                            | -                                                 | < 2 mm                                      | Propriedades físico-química das conchas de ostras; capacidade de adsorção e remoção de fósforo em <i>wetlands</i> de fluxo subsuperficial vertical.                                                                                                                                                                                                                                                                            | Águas residuais de suínos de tanque anaeróbico                                                                                                                                             | Tempo de retenção hidráulico de 0,02 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d = 95,88% de remoção;<br>Tempo de retenção hidráulico de 0,06 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d = 87,96% de remoção                      |
| 10. Avaliação da eficiência de remoção de fósforo com pó de casca em águas residuais de fósforo sintético.                                                                                                                                                              | -                                                 | -                                           | Taxa de remoção de fósforo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Águas residuais de fósforo sintético                                                                                                                                                       | 90% (pH entre 7-8)                                                                                                                                                                                             |
| 11. Investigação sobre o potencial uso de conchas de mexilhão como material removedor de fósforo, e sobre os mecanismos pelos quais o elemento é removido de soluções aquosas em batelada e coluna.                                                                     | <i>Mytilus galloprovincialis</i>                  | < 2 mm                                      | Cinética e eficiência de remoção de fósforo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Solução com NaNO <sub>3</sub> 0,01 M contendo diferentes concentrações de fósforo (0,03 a 16 mmol P L <sup>-1</sup> )                                                                      | Conchas finamente moídas (não calcinada) = 60 e 78% remoção de fósforo;<br>Conchas calcinadas = 77 e 89% remoção de fósforo                                                                                    |
| 12. Avaliação sobre o potencial da utilização de conchas de moluscos como substrato na adsorção de ortofosfato em meio aquoso com vistas ao desenvolvimento de tecnologia de tratamento terciário de efluentes domésticos de baixo custo e baixo impacto ambiental.     | <i>Venerupis pullastra</i>                        | 200, 500 e 1.000 μm                         | Tempo de contato, pH da solução, concentração de fósforo, quantidade de substrato, granulometria do substrato, temperatura e velocidade de rotação da mesa agitadora orbital.<br>Análise da composição da matéria prima (cinzas volantes de carvão, lodo de estação de tratamento de água e concha de ostra); preparação e otimização do <i>ceramsite</i> com os diferentes materiais; adsorção estática e dinâmica de fósforo | Solução padrão de ortofosfato e efluentes de tratamento secundário                                                                                                                         | Solução padrão = 97,2% remoção de fósforo; Efluentes: biorreator de membrana submersa = 91% remoção de ortofosfato; lagoa de estabilização de águas residuais = 86% remoção de ortofosfato                     |
| 13. Desenvolvimento de um substrato de <i>ceramsite</i> sustentável com boa capacidade de adsorção de fósforo para <i>wetlands</i> construídos, buscando melhorar a imobilização de fósforo em ambientes úmidos e prolongar a vida útil do substrato.                   | -                                                 | < 0,125 mm                                  | Propriedades físico-químicas do substrato; caracterização da planta; Remoção de fósforo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Solução de KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> e efluente secundário de estação de tratamento de esgoto (~2 mg PT L <sup>-1</sup> )                                                            | Solução de KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> = 95% remoção de fósforo; Efluente secundário bruto = até 90% de remoção de fósforo                                                                                 |
| 14. Investigação sobre a aplicabilidade de conchas de moluscos cruas e calcinadas como materiais de filtro <i>wetlands</i> de fluxo subsuperficial horizontal em escala de laboratório (HSSF) para remoção de fósforo em água residuária suína digerida anaerobicamente | Amêijoas de casca dura ( <i>Meretrix lyrata</i> ) | 1,4 a 2 mm                                  | Propriedades físico-químicas do substrato; caracterização da planta; Remoção de fósforo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Solução sintética de NH <sub>4</sub> Cl + KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (concentração de 12,5 mg P L <sup>-1</sup> e 125 mg NH <sub>4</sub> -N L <sup>-1</sup> ) e águas residuais reais | Amostra sintética >80% remoção de fósforo; Amostra real >70% remoção de fósforo                                                                                                                                |
| 15. Avaliação da viabilidade do emprego de resíduos de conchas de mexilhão para remoção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> em solução sintética e efluente de estação de tratamento de esgoto doméstico                                                                   | -                                                 | 0,60 a 1,18 mm                              | Capacidade de adsorção de fósforo em solução sintética e efluente de ETE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Solução sintética de KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> e efluentes secundários (concentração média de 7 mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> L <sup>-1</sup> )                                   | Amostra sintética = 31,3, 47,9 e 75,1% após 120 h com as quantidades de 4, 12 e 20 g, respectivamente, do substrato; Efluente real = 23,9, 51,6 e 66,2% utilizando 4, 12 e 20 g, respectivamente, do substrato |
| 16. Utilização das cascas do mexilhão zebra como um recurso mineral alternativo ao carbonato de cálcio extraído para a produção de cal para remoção de fósforo em águas residuais.                                                                                      | Mexilhão-zebra ( <i>Dreissena polymorpha</i> )    | cascas tratadas termicamente grossas (500 a | Taxa de remoção de fósforo com substrato submetido a temperaturas entre 600 e 1000°C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Solução sintética (43,86 mg L <sup>-1</sup> de fósforo monopotássico + água da                                                                                                             | Cascas aquecidas a 600°C > 6,9% e 11,8% remoção de fósforo; cascas aquecidas a 700°C = 98,8% e 97,2% remoção de fósforo; e cascas aquecidas a 800°C e                                                          |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                              |                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17. Investigação a respeito do potencial de cascas de mexilhão e ostra como adsorvente de fosfato, a fim de evitar a eutrofização em corpos d'água sensíveis.                                                                                                                                                                                                                                    | <i>Mytilus edulis</i> e <i>Ostrea edulis</i> | 1.000 $\mu\text{m}$ e finas (< 75 $\mu\text{m}$ )<br><br>cascas modificadas termoquimicamente com KOH, trituradas e peneiradas < 0,125 mm. | Caracterização instrumental, estudos cinéticos, isotérmicos e de dessorção, potencial de tratamento de efluentes                                                                                     | torneira, atingindo 10 mg P L <sup>-1</sup> )<br><br>Solução aquosa de fosfato e águas residuais secundárias                                      | temperaturas superiores resultaram na remoção quase completa do fósforo.<br>Solução aquosa: Material cru < 20% (ostra) e < 10% (mexilhão) de remoção P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ; termicamente modificado < 50% (ostra) e 20% (mexilhão) de remoção P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ; quimicamente modificado > 50% (ostra) e >50% (mexilhão) de remoção P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ; termoquimicamente modificado: < 80% (ostra) e 100 % (mexilhão) de remoção P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ; Águas residuais secundárias: < 70% (moluscos) < 40% (mexilhão) |
| 18. Investigação sobre os fatores que afetam a adsorção de fosfato e informações detalhadas sobre as propriedades de equilíbrio e remoção cinética do fosfato em processo otimizado de adsorção por conchas de ostra.                                                                                                                                                                            | -                                            | < 0,074 mm                                                                                                                                 | Efeitos das concentrações iniciais e valores de pH na adsorção de P; isotermas de adsorção e modelos cinéticos.                                                                                      | Soluções de fosfato de 3, 5, 10, 15, 20 e 25 mg L <sup>-1</sup>                                                                                   | Taxas de remoção superior a 90% para todas as concentrações, com o substrato (conchas de ostra e sílica pirogênica) submetido a 800°C por 1 h                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 19. Testagens para avaliar a eficiência de remoção de fósforo de materiais selecionados (conchas de ostras, conchas de mexilhões, corais triturados e esferas de nanopartículas); análise do mecanismo de remoção de fósforo do material marinho (após pirólise) e proposta de um material de remoção de fósforo eficiente que possibilite melhorar o tratamento de fósforo em <i>wetlands</i> . | -                                            | < 0,3 mm, exceto as esferas de nanopartículas                                                                                              | Avaliação da eficiência de remoção de fósforo dos materiais selecionados; verificação do mecanismo de remoção de fósforo do material marinho (após pirólise).                                        | solução de monofosfato, água desmineralizada adicionada de KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> e efluente doméstico bruto (~10 mg P L <sup>-1</sup> ) | Todos os materiais pirolisados removeram imediatamente quase todo o fósforo (> 95%), e ao longo do experimento a eficiência de remoção aumentou (ou se manteve) acima de 99%. Em contrapartida, as matérias-primas não proporcionaram remoção eficiente de fósforo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 20. Utilização de três sorventes (Filtralite® Pure, espuma de vidro poroso e conchas trituradas) para avaliação da remoção de fósforo de efluentes tratados biologicamente.                                                                                                                                                                                                                      | -                                            | Filtralite® Pure (0,5 a 4 mm) e conchas trituradas (2,5 a 3,15 mm)                                                                         | Remoção de fósforo de águas residuais de estação de tratamento                                                                                                                                       | Águas residuais tratadas biologicamente                                                                                                           | Filtralite® Pure = 98%, espuma de vidro = 81% e concha triturada = 45% de remoção de P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 21. Investigação a respeito da viabilidade de utilização de resíduos de conchas de mexilhão revestidas com ferro para remoção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> de solução sintética.                                                                                                                                                                                                             | -                                            | 0,6 a 1,18 mm                                                                                                                              | Influência da concentração inicial de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ; dosagem de adsorvente; tempo de contato na remoção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ; utilização de modelos de isotermas       | Solução sintética de fósforo (100 mg P L <sup>-1</sup> )                                                                                          | Resultados de 86,1, 94,8 e 96,9% para remoção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> após um tempo de contato de 48h com as quantidades de substrato (aquecido a 100°C por 8 h) de 4, 12 e 20 g, respectivamente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 22. Avaliação do potencial de resíduos de conchas de mexilhão na remoção de fosfato em solução aquosa, investigando a cinética de adsorção e o modelo isotérmico em experimentos em batelada.                                                                                                                                                                                                    | -                                            | 0,6 a 1,18 mm                                                                                                                              | Taxa de remoção de fosfato e aplicação de modelo de isotermas                                                                                                                                        | Água residuária sintética em concentração de 5, 10, 15, 20 e 25 mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> L <sup>-1</sup>                                  | A eficiência de remoção foi melhorada com a diminuição da concentração de fosfato no efluente sintético.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 23. Investigação sobre a cinética da adsorção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> por resíduos de conchas de mexilhão em efluente de estação de tratamento de águas residuais domésticas, utilizando diferentes profundidades de leitos em coluna hidrodinâmica e aplicando modelos de transferência de massa.                                                                                      | -                                            | tamanho médio em torno de 0,89 mm                                                                                                          | Cinética da adsorção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ; remoção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , COD e SS; e comportamento da resistência de transferência de massa | Efluente secundário de ETE (~7 mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> L <sup>-1</sup> )                                                                 | As eficiências de remoção de PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , COD e SS do efluente na coluna de fluxo em pistão atingiram os valores de 96, 9, 39 e 60%, respectivamente, após um período de contato de 3,5 h.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

|                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                  |                                                                                   |                                                                                       |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 24. Investigação sobre a aplicabilidade de resíduos de conchas de mexilhão revestido com ferro na remoção de fosfato em efluentes de estações de tratamento de águas residuais domésticas, utilizando um sistema em batelada.                        | -                                                | 0,6 a 1,18 mm                                                                     | Efeito da concentração inicial; tempo de contato; utilização de modelos de isoterma   | Efluente secundário de ETE (~7 mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> L <sup>-1</sup> )                                                             | A eficiência ótima de remoção de fosfato pode chegar a 95,7% após um tempo de contato de 120h com a quantidade de 20 g do substrato (aquecido a 100°C por 8 h).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 25. Comparação do desempenho de remoção de fosfato em efluente sintético submetido a diferentes tipos de adsorventes e diferentes tamanhos de partículas, e aplicação de modelos cinéticos e isoterma com base nos dados do experimento em batelada. | Molusco do pântano ( <i>Polymesoda expansa</i> ) | 1,18 a 2,36 mm, 0,60 a 1,18 mm, 0,30 a 0,60 mm, 0,15 a 0,30 mm, e 0,075 a 0,15 mm | Taxa de remoção de fosfato.                                                           | Solução sintética (25 mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> L <sup>-1</sup> )                                                                      | Maior eficiência de 73% de remoção de fosfato com tamanho de partícula de 1,18 a 2,36 mm, seguida de 67,34% com tamanho de partícula de 0,075 mm. Menor eficiência de remoção com o tamanho de partícula de 0,6 mm, 18,42%. O aumento do tempo de contato aumentou a eficiência de remoção. Concha de ostra aquecida sob atmosfera de ar (750°C): até 68% de remoção de fósforo; concha de ostra pirolisada sob nitrogênio (750 e 800°C): até 98% de remoção de fósforo; conchas de ostras cruas quase não removeram fósforo. |
| 26. Desenvolvimento de um meio para converter resíduos de conchas de ostras, através de aquecimento, em material que possa ser usado para a remoção de fosfato de águas residuais.                                                                   | -                                                | -                                                                                 | Efeito da temperatura e atmosfera do forno no substrato; e taxa de remoção de fósforo | Solução padrão de fosfato                                                                                                                     | O sistema integrado considerado altamente eficaz na remoção de DBO (92,3%), N (85,7%), P (98,3%) e SST (94,4%) com base em 1 ano de operação e sob o tempo de retenção hidráulica geral de 3,5 dias. O balanço de massa revelou que a maior parte da entrada de P (87,7%) foi removida pelo substrato, enquanto a absorção pelas plantas foi responsável por apenas 7% da remoção de P.                                                                                                                                       |
| 27. Investigação sobre a aplicabilidade de um sistema integrado de <i>wetland</i> construídos, utilizando conchas de ostras como substrato, para remoção de fósforo em efluentes de baixa resistência.                                               | -                                                | > 0,6 mm e 0,3 a 0,6 mm                                                           | Balanço de massa e eficiência de remoção de fósforo e outros parâmetros               | Águas residuais enriquecidas com KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (concentrações de 10 a 27 mg P L <sup>-1</sup> )                             | O sistema integrado considerado altamente eficaz na remoção de DBO (92,3%), N (85,7%), P (98,3%) e SST (94,4%) com base em 1 ano de operação e sob o tempo de retenção hidráulica geral de 3,5 dias. O balanço de massa revelou que a maior parte da entrada de P (87,7%) foi removida pelo substrato, enquanto a absorção pelas plantas foi responsável por apenas 7% da remoção de P.                                                                                                                                       |
| 28. Avaliação do emprego de resíduos de conchas de ostras como meio de filtros biológicos aerados.                                                                                                                                                   | -                                                | Concha de ostra 2,0 a 5,0 cm                                                      | Taxa de remoção de fósforo total                                                      | Águas residuais locais (1,7 ± 0,3 mg P-PO <sub>4</sub> ; 2,4 ± 0,7 mg PT L <sup>-1</sup> ; 28,1 ± 12,4 mg N-NH <sub>4</sub> L <sup>-1</sup> ) | 1,6% - 49,8% remoção de fósforo, sendo removido, principalmente, devido ao consumo por microrganismos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Com relação às espécies de moluscos na qual foram utilizados os resíduos das conchas, verifica-se que apenas oito publicações apresentaram essa informação. Os materiais foram obtidos *in natura* e/ou provenientes de doações de fábricas de processamento. De acordo com Abeynaike et al. (2011), algumas dessas fábricas transformam as conchas em produtos ricos em carbonatos e óxidos, eliminando matéria orgânica residual, odores indesejáveis e microrganismos, além de lavar, triturar e peneirar as conchas e, às vezes, também realizar a calcinação. Dentre o tipo de obtenção e as espécies indicadas nas pesquisas, destacam-se o mexilhão de lábio verde (*P. canaliculus*) (Abeynaike et al., 2011; Jones et al., 2011), também conhecido como mexilhão da Nova Zelândia, doados por fábricas de processamento de moluscos; a *Mytilus galloprovincialis* (Paradelo et al., 2016), doada em estado calcinado por uma fábrica e também obtida *in natura* na ilha de Arousa, Espanha; a *Venerupis pullastra* (Vieira, Coelho & Jesus, 2019), adquirida em um mercado em São Paulo, Brasil; as amêijoas de casca dura (*Meretrix lyrata*) (Zapater-Pereyra et al., 2014), doadas por fábricas de processamento de amêijoas congeladas, no norte do Vietnã; o mexilhão-zebra (*Dreissena polymorpha*) (McCorquodale-Bauer & Cicek, 2020), coletadas em uma praia próximo ao lago Winnipeg, no Canadá; o mexilhão azul (*Mytilus edulis*) e ostra (*Ostrea edulis*) (Pap et al.,

2022), coletados da praia de Castletown, entre a Escócia e Reino Unido e o molusco do pântano (*Polymesoda expansa*) (Abdullah et al., 2023), coletado na Malásia.

Tão relevante quanto à informação das espécies é o conhecimento sobre a composição química dos materiais utilizados nos experimentos. Essa composição pode variar de acordo com o ambiente em que estão localizados. As conchas de moluscos são constituídas principalmente por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Paradelo et al., 2016; Cheng et al., 2018; Vieira, Coelho & Jesus, 2019; McCorquodale-Bauer & Cicek, 2020; Cheng et al., 2023), além de outros elementos em proporções menores, como apresentado na Tabela 4. É importante observar que os estudos utilizaram diferentes unidades de medida ( $\text{g kg}^{-1}$ , % de peso seco e %) para relatar os resultados da composição química dos materiais. Essa variação nas unidades se deve aos diferentes métodos adotados pelos pesquisadores, não sendo possível apresentá-los numa mesma unidade. Portanto, é preciso considerar essa variação ao interpretar os resultados da Tabela 4.

De acordo com Paradelo et al. (2016), é justamente o alto teor de cálcio que desperta o interesse científico na possibilidade de utilização desse tipo de material para remoção de compostos fosfatados em águas residuárias, o que é considerado como um método de baixo custo.

Tabela 4. Principais resultados da composição das conchas de moluscos encontrados nos artigos. Fonte: Silva, Rodrigues & Ursulino (2023).

| Variáveis<br>(composição<br>química) | Paradelo et al. (2016)                 |                                            | Kwon et al. (2004)                 | McCorquodale-<br>Bauer & Cicek (2020) |
|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
|                                      | Concha moída<br>( $\text{g kg}^{-1}$ ) | Concha calcinada<br>( $\text{g kg}^{-1}$ ) | Concha ostra crua<br>(% peso seco) | Conchas de<br>mexilhão-zebra (%)      |
| $\text{CaCO}_3$                      | -                                      | -                                          | -                                  | 86,6                                  |
| C                                    | 114                                    | 128                                        | -                                  | -                                     |
| S                                    | 3,4                                    | 2,1                                        | -                                  | -                                     |
| N                                    | 2,1                                    | 2,6                                        | -                                  | -                                     |
| Ca                                   | 280                                    | 399,0                                      | 37,40                              | -                                     |
| Na                                   | 5,2                                    | 5,3                                        | -                                  | -                                     |
| K                                    | 202                                    | 503,0                                      | 0,012                              | 0,03 ±0,03                            |
| Mg                                   | 981                                    | 1968,0                                     | 0,269                              | -                                     |
| P                                    | 54                                     | 62,0                                       | -                                  | -                                     |
| Fe                                   | -                                      | -                                          | 0,034                              | 0,008 ±0,003                          |
| Al                                   | -                                      | -                                          | 0,036                              | -                                     |
| Mn                                   | -                                      | -                                          | 0,011                              | 0,005 ±0,001                          |
| Cu                                   | -                                      | -                                          | 0,001                              | 0,0006 ±0,001                         |
| Zn                                   | -                                      | -                                          | 0,011                              | 0,015 ±0,01                           |

No que concerne aos parâmetros de qualidade dos efluentes submetidos aos diferentes tipos de tratamento, foi observado que as pesquisas direcionaram as investigações principalmente à remoção de compostos como o fósforo, fosfato e

ortofosfato. Alguns autores associaram as técnicas aplicadas ao controle da eutrofização dos corpos hídricos (Yu, Wu & Clark, 2010; Abeynaike et al., 2011; Pap et al., 2022; Abdullah et al., 2023), uma vez que o fósforo é considerado um nutriente

limitante do crescimento em corpos d'água estáticos.

Não obstante, outras variáveis também foram investigadas nos artigos selecionados. Particularmente, estudos voltados ao entendimento e posteriormente a otimização dos processos que mais influenciam as altas taxas de eficiência de remoção. A exemplo, essas investigações incluíam o tamanho ideal das partículas dos materiais, o tempo de aquecimento e a temperatura selecionada quando houve tratamento térmico, a influência do pH, bem como análises voltadas para o estudo da composição físico-química das conchas antes e depois de determinados pré-tratamentos (Tabela 4), comumente aplicados a esses resíduos. Dentre os 28 artigos analisados, 11 deles abordaram uma ou mais dessas variáveis.

O pré-tratamento, ou tratamento, aplicado às conchas de moluscos antes de serem utilizados nos processos de remoção de compostos fosfatados, foram, na maior parte dos estudos, lavagem dos materiais brutos seguida de trituração, peneiramento e tratamento térmico, a fim de alcançar a decomposição de carbonatos (Kwon et al., 2004). O processo de lavagem é realizado com água corrente para remoção de sal e outros detritos e, em seguida, as cascas são secas a temperatura ambiente ou em estufa (Kwon et al., 2004; Vieira, Coelho & Jesus, 2019; Salim et al., 2022a; Pap et al., 2022). Para a trituração foram citados diferentes materiais, como almofariz e pilão, triturador de argamassa e moedor. As malhas utilizadas no peneiramento diferiram de acordo com o objetivo da investigação, e são detalhadas na Tabela 4. No tratamento térmico foram utilizados fornos do tipo mufla, alguns com atmosfera de nitrogênio (pirólise), e temperaturas em torno de 550 a 800°C por tempos variados, como 15 min (Paradelo et al., 2016), 1h (Kwon et al., 2004) e entre 1 h e 2 h (Zapater-Pereyra et al., 2014). Outro tipo de tratamento térmico foi realizado por Pap et al. (2022), modificando as cascas, termoquimicamente, com hidróxido de potássio (KOH) e calcinação, para melhorar a capacidade de adsorção.

Entre os tipos de amostras utilizadas pelos autores, observa-se que soluções sintéticas e águas residuais reais são os dois tipos principais de amostras submetidas para testar a eficiência de remoção dos materiais em relação ao fósforo, fosfato e ortofosfato. Dentre as amostras, as soluções sintéticas foram as mais utilizadas nos respectivos artigos, aparecendo em 17 estudos, enquanto 6 optaram por amostras reais, e outros 5 utilizaram-se de ambos os tipos de amostra. A preferência por amostras sintéticas com concentrações conhecidas pode ser associada à

redução de possíveis interferências nos resultados quando se faz uso de efluentes reais, uma vez que, como apontado por Vieira, Coelho & Jesus (2019), ocorre uma menor eficiência de remoção em amostras reais do que em amostras sintéticas, mesmo utilizando-se das mesmas condições em ambas as amostras. Essa escolha em utilizar soluções sintéticas também pode estar associada a baixa concentração dos compostos fosfatados em alguns efluentes, o que pode dificultar a determinação da concentração quando submetido a tratamentos com elevados níveis de remoção.

A respeito dos efluentes reais, a maior parte das amostras foi proveniente de tratamento secundário (Cheng et al., 2018; Vieira, Coelho & Jesus, 2019; Salim et al., 2021a, 2022ab; Pap et al., 2022), seguido de efluente doméstico bruto (Liu et al., 2010; Zapater-Pereyra et al., 2014), efluente doméstico de ETE (Cui, Liu & Wang, 2010), efluente de um tanque anaeróbico tratando dejetos de suínos (Wang et al., 2013b) e efluentes domésticos tratados biologicamente (Šarko & Mažeikienė, 2020).

Os resultados de eficiência de remoção de fósforo, ortofosfato e fosfato se mostraram largamente positivos, uma vez que, dos 28 artigos, 18 apresentaram taxas de remoção superiores a 90%, quatro entre 70 e 90% e cinco resultaram em eficiências abaixo dos 50%. Entre as maiores taxas de remoção, sobressaem-se os artigos que submeteram os materiais a determinados pré-tratamentos, como o peneiramento, visando a obtenção de granulometrias controladas, ou submetendo-os a altas temperaturas (> 600 °C) por determinados períodos, como no artigo de McCorquodale-Bauer & Cicek (2020) que, fazendo uso de granulometrias de 75 µm, 500 e 1000 µm e temperaturas de 700 e 800°C obtiveram eficiências de remoção maiores que 95%.

Quanto à potencialidade de reutilização desses materiais, Pap et al. (2019) destacam que, quando utilizados como fertilizante/condicionador de solo, as conchas podem melhorar as propriedades físicas, fornecendo nutrientes essenciais para as plantas e atuando como um tamponador contra a acidificação do solo. Esses benefícios podem substituir fertilizantes inorgânicos caros, proporcionando estabilidade do solo e benefícios econômicos. Por sua vez, ao verificar o potencial de adsorção de fósforo por conchas de ostras comparadas a substratos tradicionais, Cheng et al. (2018) enfatizam que a reutilização desses materiais para o tratamento de efluentes pode gerar impactos econômicos e sociais positivos. Kwon et al. (2004), ao realizarem uma estimativa preliminar de viabilidade econômica para uma usina de reciclagem, verificaram que o

produto obtido a partir das conchas de moluscos é competitivo em relação a outros produtos químicos utilizados no tratamento de águas residuais. Tais processos estariam evidentemente alinhados com os princípios de uma “economia mais circular” (Pap et al., 2021).

Essas informações enfatizam a capacidade das conchas de moluscos como um recurso viável e sustentável para o tratamento de efluentes, com benefícios econômicos, sociais e ambientais.

### Conclusão

A quantidade de artigos voltados para a reutilização de resíduos de conchas de moluscos, como substrato, para o tratamento de águas residuais, vem crescendo ao longo dos anos, com importantes pesquisas realizadas em diversas partes do mundo, em especial nos países asiáticos. Ainda assim, outras regiões também apresentaram pesquisas sobre o tema, tendo sido publicadas em uma grande variedade de periódicos voltados a diferentes temáticas. A diversidade das áreas de pesquisa incluiu, não só as investigações referentes ao processo físico e químico do tratamento de efluentes, mas, também, as questões econômicas e a preocupação quanto à mitigação dos impactos no descarte incorreto desses materiais.

Constatações a respeito da eficiência de adsorção de compostos fosfatados em efluentes se mostraram fortemente promissoras, uma vez que a grande maioria dos autores, mesmo utilizando-se de condições diferentes, obtiveram altas taxas de remoção. No que diz respeito à aplicação de tecnologias, foi verificada uma ampla utilização de sistemas descentralizados do tipo *wetlands* construídos, que é um sistema ecológico, natural, de custo relativamente baixo e energeticamente eficiente, com potencialidade de funcionamento em regiões com condições climáticas mais quentes, como o Brasil.

Considerando esses aspectos, é imprescindível a continuidade de estudos na busca de novas descobertas, empregando os resíduos de conchas em diferentes arranjos e tecnologias como meio de otimizar o tratamento de efluentes e o gerenciamento de resíduos de forma sustentável.

### Referências

- Abdullah, N. H.; Syahrul, M.; Yaacob, S.; Athirah, N.; Rani, I.; Muhammad, T.; Haziq, F.; Azman, T.; Nur, M.; Sumawan, I.; Hamid, N. B.; Atikah, N.; Salim, A.; Kaamin, M.; Azraie, M.; Kadir, A.; Ahmad, N.; Lazim, Z. M.; Nuid, M.; Talaiekhazani, A. 2021. Phosphate Adsorption from Synthetic Aqueous Solutions by Waste Mussel Shell: Kinetics and Isotherms Studies. *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, 14, 1-10.
- Abdullah, N. H.; Xian, O. J.; Yi, C. Z.; Yuan, N. S.; Yaacob, M. S. S.; Salim, N. A. A.; Ahmad, N.; Lazim, Z. M.; Nuid, M.; Abdullah, F. 2023. Removal of Phosphate from Synthetic Wastewater by Using Marsh Clam (*Polymesoda expansa*) Shell as an Adsorbent. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13, 1-12. <https://doi.org/10.33263/BRIAC131.056>
- Abeynaike, A.; Wang, L.; Jones, M. I.; Patterson, D. A. 2011. Pyrolysed powdered mussel shells for eutrophication control: Effect of particle size and powder concentration on the mechanism and extent of phosphate removal. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 6, 231-243. <https://doi.org/10.1002/apj.426>
- Barros, M. C.; Magán, A.; Valiño, S.; Bello, P. M.; Casares, J. J.; Blanco, J. M. 2009. Identification of best available techniques in the seafood industry: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 17, 391-399. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.08.012>
- Chen, J.; Cai, Y.; Clark, M.; Yu, Y. 2013. Equilibrium and Kinetic Studies of Phosphate Removal from Solution onto a Hydrothermally Modified Oyster Shell Material. *PLoS ONE*, 8, 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0060243>
- Cheng, G.; Li, Q.; Su, Z.; Sheng, S.; Fu, J. 2018. Preparation, optimization, and application of sustainable ceramsite substrate from coal fly ash/waterworks sludge/oyster shell for phosphorus immobilization in constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, 175, 572-581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.102>
- Cheng, M.; Liu, M.; Chang, L.; Liu, Q.; Wang, C.; Hu, L.; Zhang, Z.; Ding, W.; Chen, L.; Guo, S.; Qi, Z.; Pan, P.; Chen, J. 2023. Overview of structure, function and integrated utilization of marine shell. *Science of the Total Environment*, 870, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161950>
- Cui, Y., Liu, C., Wang, L. 2010. Feasibility of Acidogenesis Reactor with Shell Carrier for Domestic Wastewater Treatment. 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Chengdu, China, pp. 1-3, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5517515>

- Cui, Y.; Tong, Q.; Zhao, J. 2010. Performance of Substrates Removal in Biological Aerated Filter with Shell Carriers. *Anais Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental Technology and Knowledge Transfer*, Dalian, China, pp. 499-502.
- Fagundes, S. T. F.; Silva, L. B. 2022. Potencial uso dos resíduos de conchas de moluscos: uma revisão. *Research, Society and Development*, 11, 1-11. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26614>
- Jones, M. I.; Wang, L. Y.; Abeynaike, A.; Patterson, D. A. 2011. Utilisation of waste material for environmental applications: Calcination of mussel shells for waste water treatment. *Advances in Applied Ceramics*, 110, 280-286. <https://doi.org/10.1179/1743676111Y.0000000016>
- Kwon, H. B.; Lee, C. W.; Jun, B. S.; Yun, J.; Weon, S. Y.; Koopman, B. 2004. Recycling waste oyster shells for eutrophication control. *Resources, Conservation and Recycling*, 41, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.08.005>
- Liao, Y.; Wang, X.; Kong, D.; Da, B.; Chen, D. 2023. Experiment research on effect of oyster shell particle size on mortar transmission properties. *Construction and Building Materials*, 375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131012>.
- Li, H. Y.; Tan, Y. Q.; Zhang, L.; Zhang, Y. X.; Song, Y. H.; Ye, Y.; Xia, M. S. 2012. Bio-filler from waste shellfish shell: preparation, characterization, and its effect on the mechanical properties on polypropylene composites. *Journal of Hazardous Materials*, 217-218, 256-262. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.028>
- Li, X., Li, Q., Cheng, N., Liu, Y., Cui, Y. 2010. Substrates removal in anaerobic reactor with shell carriers. *Anais Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental Technology and Knowledge Transfer*, Dalian, China, pp. 503-505.
- Liu, Y. X.; Yang, T. O.; Yuan, D. X.; Wu, X. Y. 2010. Study of municipal wastewater treatment with oyster shell as biological aerated filter medium. *Desalination*, 254, 149-153. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.12.003>
- Martins, M. C.; Santos, E. B. H.; Marques, C. R. 2017. First study on oyster-shell-based phosphorous removal in saltwater - A proxy to effluent bioremediation of marine aquaculture. *Science of The Total Environment*, 574, 605-615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.103>.
- McCorquodale-Bauer, K.; Cicek, N. 2020. Zebra mussel shells as an alternative mineral resource for lime production as a phosphorus precipitant. *Environmental Technology*, 43, 1446-1457. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1836029>.
- Nadeem, Y. 2018. Potential for Treatment of Household Wastewater by Using Waste Seashells as a Biofilter Media. Tese de Mestrado, Universidade Norueguesa de Ciências Ambientais e Biológicas. 60p.
- Nguyen, T. A. H.; Ngo, H. H.; Guo, W. S.; Nguyen, T. T.; Vu, N. D.; Soda, S.; Nguyen, T. H. H.; Nguyen, M. K.; Tran, T. V. H.; Dang, T. T.; Nguyen, V. H.; Cao, T. H. 2020. White hard clam (*Meretrix lyrata*) shells as novel filter media to augment the phosphorus removal from wastewater. *Science of the Total Environment*, 741, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140483>
- Pap, S.; Gaffney, P. P. J.; Bremner, B.; Turk Sekulic, M.; Maletic, S.; Gibb, S. W.; Taggart, M. A. 2022. Enhanced phosphate removal and potential recovery from wastewater by thermo-chemically calcinated shell adsorbents. *Science of the Total Environment*, 814, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152794>
- Pap, S.; Sekulic, M. T.; Bremner, B. M.; Taggart, A. 2021. From molecular to large-scale phosphorous recovery from wastewater using cost-effective adsorbents: an integrated approach. In: Mohammad, A. W.; Ang, W. L. [eds.]. *Integrated and Hybrid Process Technology for Water and Wastewater Treatment*, pp. 61-85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823031-2.00025-2>.
- Paradelo, R.; Conde-Cid, M.; Cutillas-Barreiro, L.; Arias-Estévez, M.; Nóvoa-Muñoz, J. C.; Álvarez-Rodríguez, E.; Fernández-Sanjurjo, M. J.; Núñez-Delgado, A. 2016. Phosphorus removal from wastewater using mussel shell: Investigation on retention mechanisms. *Ecological Engineering*, 97, 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.066>
- Park, W. H. 2009. Integrated constructed wetland systems employing alum sludge and oyster

- shells as filter media for P removal. *Ecological Engineering*, 35, 1275-1282. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.05.015>
- Park, W. H.; Polprasert, C. 2008. Roles of oyster shells in an integrated constructed wetland system designed for P removal. *Ecological Engineering*, 34, 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.05.014>
- Salim, N. A. A.; Zaini, M. A. A.; Fulazzaky, M. A.; Puteh, M. H.; Abdullah, N. H.; Nuid, M.; Lazim, Z. M.; Ahmad, N. 2022a. A Two-Stage Batch System for Phosphate Removal from Wastewater by Iron-Coated Waste Mussel Shell to Assess the Optimum Adsorbent Dosage. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 44, 10-20. <https://doi.org/10.3103/S1063455X22010088>
- Salim, N. A. A.; Fulazzaky, M. A.; Puteh, M. H.; Khamidun, M. H.; Yusoff, A. R. M.; Abdullah, N. H.; Nuid, M. 2021a. Adsorption of phosphate from aqueous solution onto iron-coated waste mussel shell: Physicochemical characteristics, kinetic, and isotherm studies. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11, 12831-12842. <https://doi.org/10.33263/BRIAC115.128312842>
- Salim, N. A. A.; Fulazzaky, M. A.; Puteh, M. H.; Khamidun, M. H.; Yusoff, A. R. M.; Abdullah, N. H.; Fulazzaky, M.; Zaini, M. A. A. 2022a. Mass Transfer Kinetics and Mechanisms of Phosphate Adsorbed on Waste Mussel Shell. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05693-8>
- Salim, N. A. A.; Fulazzaky, M. A.; Zaini, M. A. A.; Puteh, M. H.; Khamidun, M. H.; Yusoff, A. R. M.; Abdullah, N. H.; Ahmad, N.; Lazim, Z. M.; Nuid, M. 2021b. Phosphate removal from wastewater in batch system using waste mussel shell. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11, 11473-11486. <https://doi.org/10.33263/BRIAC114.114731486>
- Santos, T. S.; Lima, A. J.; Michelin, D. C. G. S. 2021. Perspectivas sobre o uso de materiais alternativos no tratamento de água: revisão sistemática desenvolvida em filtros lentos. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 9, 121-139.
- Šarko, J.; Mažeikienė, A. 2020. Investigation of Sorbents for Phosphorus Removal. *Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering-ICEE, Riga, Letônia*. <https://doi.org/10.3846/enviro.2020.620>
- Sun, H. J.; Yang, S. H.; Cui, Y. B. 2013. Shell powder for strengthening phosphate removal efficiency in wastewater treatment. *Advanced Materials Research*, 781-784, 2138-2141. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.781-784.2138>
- Vieira, B.; Coelho, L. H. G.; Jesus, T. A. 2019. Phosphate sorption in shellfish shell (*venerupis pularstra*) substrates: development of green and low-cost technology for tertiary treatment of effluents. *Journal of Environmental Engineering*, 145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001489](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001489)
- Wang, Z.; Dong, J.; Liu, L.; Zhu, G.; Liu, C. 2013a. Study of oyster shell as a potential substrate for constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 67, 2265-2272. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.105>
- Wang, Z.; Dong, J.; Liu, L.; Zhu, G.; Liu, C. 2013b. Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater. *Ecological Engineering*, 54, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.017>
- Yao, Z.; Xia, M.; Li, H.; Chen, T.; Ye, Y.; Zheng, H. 2014. Bivalve shell: not an abundant useless waste but a functional and versatile biomaterial. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44, 2502-2530. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829763>
- Yu, Y.; Wu, R.; Clark, M. 2010. Phosphate removal by hydrothermally modified fumed silica and pulverized oyster shell. *Journal of Colloid and Interface Science*, 350, 538-543. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.06.033>
- Zapater-Pereyra, M.; Mallocci, E.; van Bruggen, J. J. A.; Lens, P. N. L. 2014. Use of marine and engineered materials for the removal of phosphorus from secondary effluent. *Ecological Engineering*, 73, 635-642. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.112>