



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76

Redeclamação pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

XXIX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2025

Recuperação de fósforo em resíduos domésticos

Clailton Bastos Souza Junior¹; Eduardo Henrique Borges Cohim Silva²

1. Clailton Bastos Souza Junior, PROBIC/UEFS, ENGENHARIA CIVIL, e-mail: clailtonjunior07@gmail.com

2. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva, DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA, e-mail: ecohim@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: saneamento ecológico; recuperação de recursos; fósforo

INTRODUÇÃO

O fósforo é um insumo essencial para a agricultura global, com cerca de 90% de sua produção destinada ao setor agropecuário, especialmente na formulação de fertilizantes (Brunner, 2010). Sua extração depende da rocha fosfática, um recurso não renovável cuja escassez iminente é projetada para ocorrer em até 300 anos (IFA, 2023). Além disso, o mercado do fósforo apresenta alta volatilidade de preços, com aumentos históricos expressivos nas últimas décadas (Brownlie et al., 2022; Banco Mundial, 2024). A extração do mineral, concentrada em poucos países, demanda elevado custo energético (Harvey, 2010) e gera resíduos tóxicos que contaminam solos agrícolas e ameaçam a saúde humana e ecológica (Suciu et al., 2022; Nabil et al., 2022). Estima-se a geração de 7,5 toneladas de resíduos para cada tonelada de fósforo extraída, evidenciando que os desafios do fósforo vão além da escassez, envolvendo questões ambientais e sanitárias (Reuter et al., 2004).

Diante desse cenário, o uso insustentável do fósforo contribui para a transgressão dos limites planetários, comprometendo a estabilidade ecológica e os serviços essenciais à vida (Richardson et al., 2023). Abordagens sistêmicas, como a Análise de Fluxo de Materiais (AFM), são fundamentais para mapear entradas, estoques e saídas de fósforo, identificando perdas críticas em contextos urbanos (Brunner; Rechberger, 2016). A residência, enquanto unidade básica de consumo e descarte, representa um ponto estratégico para recuperação do nutriente via esgoto e dos resíduos orgânicos. Assim, este estudo busca identificar e quantificar os principais fluxos de fósforo em escala domiciliar, contribuindo para práticas de gestão alinhadas à sustentabilidade do metabolismo do nutriente.

MATERIAL E MÉTODOS

A modelagem dos fluxos de materiais foi realizada com o software STAN (SubSTance flow ANalysis) (Technische Universität Wien, 2022). O uso do STAN permitiu estruturar e ajustar o modelo necessário para a AFM e realizar a reconciliação de dados.

A quantificação dos fluxos teve como base três principais fontes de dados: a Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF, 2018), que forneceu os padrões de consumo alimentar das famílias brasileiras; a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA, 2013), com os teores de fósforo nos alimentos; e os balanços alimentares da FAO (2024), que incorporaram o consumo per capita total, incluindo refeições fora do lar. A caracterização de resíduos sólidos foi feita com base na ABREMA (2023) e ABRELPE (2020), enquanto o teor de fósforo no resíduo sólido orgânico (RSO) seguiu os dados de Vinneras et al. (2006). Para as águas cinzas, foram consideradas as contribuições de detergentes

(ABIPLA, 2024; Gomes de Quevedo e Da Silva Paganini, 2016) e as características das águas provenientes da lavagem de pratos em estimativas de Eriksson et al. (2002) e Boyjoo et al. (2013). Também se considerou que 10% da excreção urinária ocorre durante o banho, sendo destinada ao sistema de águas cinzas do chuveiro. Estimou-se que 90% do fósforo nas fezes e 70% na urina, oriundos de refeições fora de casa, são excretados no domicílio, integrando os fluxos internos do sistema.

Para lidar com as incertezas nos dados, adotou-se a metodologia de Laner (2015), amplamente usada em estudos de AFM, como os de Schiller et al. (2017) e Sipert e Cohim (2019). O método avalia a qualidade dos dados e quantifica as incertezas com base em cinco critérios: confiabilidade, completude, correlação temporal, geográfica e tecnológica. Essa abordagem proporciona maior precisão na avaliação da confiabilidade dos resultados e subsidia decisões mais embasadas, além de contribuir para o aprimoramento dos dados em estudos futuros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a quantificação dos fluxos apresentados na Figura 1, identificaram-se as principais correntes de fósforo no ambiente doméstico.

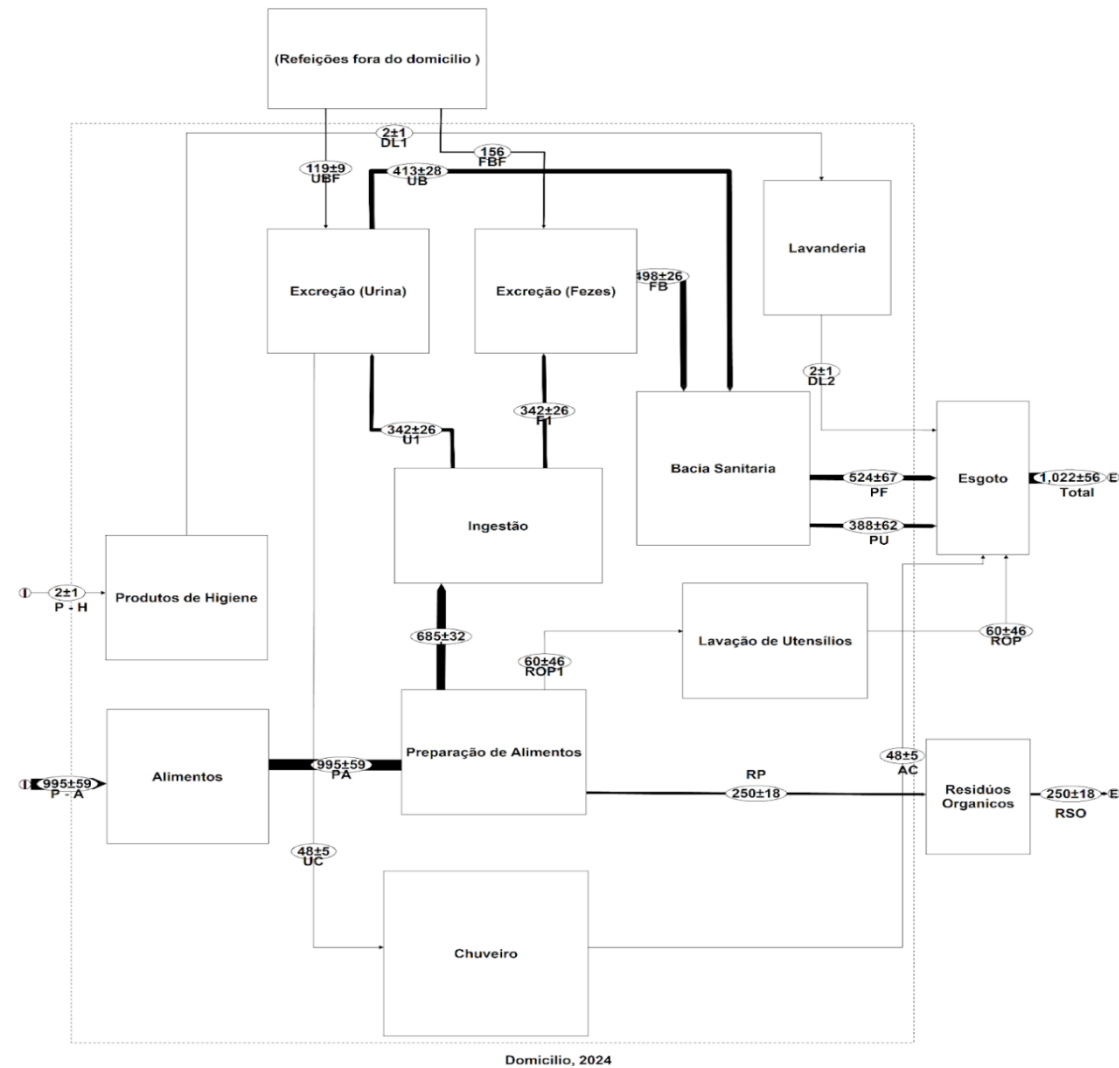


Figura 1 Modelo do fluxo de fósforo em um domicílio.

Os resultados indicam que os efluentes sanitários e os resíduos orgânicos domiciliares são fontes relevantes de perda de fósforo. desempenham papel central no ciclo biogeoquímico desse elemento. Em média, cada pessoa descarta aproximadamente 400 g de fósforo por ano, sendo 311 g via excreções e 82 g por resíduos orgânicos. Isso representa cerca de 44% do limite planetário per capita (900 g/ano). No Brasil, essa perda chegou a aproximadamente 90 Gg de fósforo em 2018, considerando a população brasileira da época.

Além das perdas residenciais, a produção de fósforo exige alto consumo energético, estimado entre 2,2 - 20 GJ por tonelada (Bahat et al., 1994; Harvey, 2010). Dessa forma, a recuperação do nutriente a partir dos efluentes domésticos pode evitar parte desse gasto, representando uma economia energética potencial de 198 a 1800 Gg considerando apenas a etapa de produção.

Os custos energéticos relacionados ao transporte de fertilizantes tornam-se ainda mais significativos, quando se considera que a produção global de fosfatos está concentrada em poucos países exportadores. Esse modelo de comercialização centralizada implica em longas cadeias logísticas, exigindo transporte de grandes volumes por extensas distâncias, o que acarreta em um alto custo energético e emissões relevantes de gases de efeito estufa (GEE).

No Brasil, os fertilizantes são a segunda maior categoria de importações, provenientes principalmente da Rússia, Canadá, China e Marrocos, com rotas marítimas que ultrapassam 57 mil quilômetros (Comexstat, 2024; Marinetraffic, 2024). Em 2018, foram entregues ao mercado 35,5 milhões de toneladas de fertilizantes, das quais 27,5 milhões foram importadas (ANDRA, 2024). Considerando o consumo energético e as emissões associadas ao transporte marítimo, estima-se uma demanda anual de cerca de 43 petajoules e emissões de CO₂ equivalentes próximas a 4 teragramas apenas para a logística de importação desses insumos (Ecoinvent 3.10.1).

O uso crescente de fertilizantes no país, que aumentou de 42,6 kg/ha em 2000 para 80,4 kg/ha em 2018 (FAO, 2025), resultou em um significativo acúmulo de fósforo no solo, tornando-se o principal reservatório nacional desse nutriente, com cerca de 40% do fósforo aplicado permanecendo no solo (Sipert e Cohim, 2019). Apesar do potencial aproveitamento dessa reserva, a aplicação excessiva pode causar desequilíbrios ecológicos, acelerando a eutrofização de ecossistemas aquáticos (Pavinato et al., 2020). Ademais, a intensificação do uso de fertilizantes contribui significativamente para as emissões de GEE, que representam até 24% das emissões globais quando consideradas as mudanças no uso da terra, sendo a produção desses insumos uma das principais fontes de emissões de GEE não relacionadas ao CO₂ (IPCC, 2014).

Diante disso, integrar o saneamento à cadeia de gestão do fósforo surge como uma alternativa viável e sustentável, com capacidade de mitigar impactos ecológicos. Investir em tecnologias e políticas públicas voltadas à recuperação de fósforo é, portanto, uma estratégia essencial não apenas para o fortalecimento da agricultura nacional, mas também para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável — promovendo um modelo mais resiliente, circular e justo ao uso dos recursos naturais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil perde cerca de 400 g de fósforo por pessoa ao ano, totalizando aproximadamente 90 Gg/ano, sendo 311 g por pessoa provenientes do esgoto doméstico. Recuperar esse fósforo pode evitar até 1800 GJ de energia na produção primária e reduzir importações de 27,5 milhões de toneladas de fertilizantes, que geram cerca de 43 PJ de demanda energética e 4 Tg de CO₂eq ao ano pelo transporte. Cerca de 40% do fósforo aplicado acumula-se no solo, e o uso crescente de fertilizantes, que atingiu 80,4 kg/ha em 2018, intensifica a eutrofização e contribui para até 24% das emissões agrícolas globais. Integrar

o saneamento à gestão do fósforo é, portanto, estratégico para reduzir perdas, mitigar impactos ambientais e promover a sustentabilidade agrícola no país.

PRINCIPAIS REFERÊNCIAS

ANUÁRIO. 2024 [online]. Disponível em: <https://abipla.org.br/anuario/>. Acesso em: 5 nov. 2024.

and treatment processes. *Water Science and Technology*, 67(7): 1403–1424.

BROWNLIE, W. J.; et al. 2022. Chapter 2. Phosphate rock: resources, reserves and uses. In: *Our Phosphorus Future*, p. 23–76.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. 2016. *Practical handbook of material flow analysis*. London: CRC Press.

ECOINVENT. Ecoinvent database, version 3.10.1. Zurich: Ecoinvent Association, 2023. Disponível em: <https://ecoinvent.org/>. Acesso em: 19 mar. 2025.

ERIKSSON, E.; et al. 2002. Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1): 85–104.

FANNING, A. L.; et al. 2021. The social shortfall and ecological overshoot of nations. *Nature Sustainability*, 5(1): 26–36.

FAOSTAT. 2024 [online]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>. Acesso em: 05 dez. 2024.

FAOSTAT. 2025 [online]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>. Acesso em: 2 jan. 2025.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION (IFA). 2023. Phosphate Rock Resources & Reserves.

IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 1454 p.

LANER, D.; et al. 2016. A novel approach to characterize data uncertainty in material flow analysis and its application to plastics flows in Austria. *Journal of Industrial Ecology*, 20(5): 1050–1063.

NEPA - NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ALIMENTAÇÃO. 2011. *Tabela brasileira de composição de alimentos*. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: NEPA-UNICAMP, 161 p.

POF 2017–2018. 2025 [online]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/24786-pesquisa-de-orcamentos-familiares-2.html?edicao=28708>. Acesso em: 2 jan. 2025.

SIPERT, S.; COHIM, E. B. 2019. A phosphorus flow analysis of Brazil. *Environmental Engineering Science*.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN. 2022 [online]. STAN (SubSTance flow ANalysis), Version 2.7.101. Disponível em: <https://www.stan2web.net>. Acesso em: 09 out. 2025.

VINNERÅS, B.; et al. 2006. The characteristics of household wastewater and biodegradable solid waste—A proposal for new Swedish design values. *Urban Water Journal*, 3(1): 3–11.