Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica
(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL FITORREMEDIADOR DE *PONTEDERIA CRASSIPES* EM ÁGUAS CONTAMINADAS COM ATENOLOL E CAFEÍNA

PRELIMINARY EVALUATION OF THE PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF *PONTEDERIA CRASSIPES* IN WATERS CONTAMINATED WITH ATENOLOL AND CAFFEINE

Yumi Chinen Guedes, Victoria Maria Iva Fonseca Seabra, Wilton Rodrigues de Souza Santos, Walber Toma, Paulo de Salles Penteado Sampaio, Luciana Lopes Guimarães

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Ciências da Saúde, Curso de Farmácia
E-mail para contato: yumichinen26@gmail.com

RESUMO – A contaminação de recursos hídricos por resíduos farmacêuticos é um problema ambiental urgente. O atenolol, fármaco betabloqueador, e a cafeína são importantes contaminantes emergentes, que se destacam pela alta presença em águas residuais e pelos danos a ecossistemas aquáticos. Contudo, há estratégias viáveis para o tratamento desses efluentes, como a fitorremediação via macrófitas aquáticas. A Pontederia crassipes, comum em ambientes dulcícolas, já provou eficácia na remoção de metais pesados. Portanto, este estudo avalia o potencial da espécie para remover atenolol e cafeína em meio aquoso, despontando como alternativa sustentável, econômica e promissora no tratamento de águas contaminadas apenas pela cafeína.

Palavras-chave: atenolol; cafeína; fitorremediação; *Pontederia crassipes*; remoção.

ABSTRACT – The contamination of water resources by pharmaceutical residues is an urgent environmental problem. Atenolol, a beta-blocker drug, and caffeine are important emerging contaminants, notable for their high presence in wastewater and their damage to aquatic ecosystems. However, there are viable strategies for treating these effluents, such as phytoremediation using aquatic macrophytes. Pontederia crassipes, common in freshwater environments, has already proven effective in removing heavy metals. Therefore, this study evaluates the potential of the species to remove atenolol and caffeine in an aqueous medium, emerging as a sustainable, economical, and promising alternative in the treatment of waters contaminated only by caffeine.

Keywords: atenolol; caffeine; phytoremediation; *Pontederia crassipes*; removing.

ISSN 2317-1316

1 INTRODUÇÃO

No século XXI, os Produtos Farmacêuticos e de Cuidados Pessoais (PPCPs) emergiram como uma classe de poluentes de preocupação global, recebendo ampla atenção de pesquisadores e órgãos reguladores governamentais devido aos seus potenciais riscos ecológicos e à saúde humana (He *et al.*, 2024). A contaminação de meios aquáticos por esses resíduos farmacêuticos tem se configurado como um problema ambiental e de saúde crescente, com impactos severos documentados não só em regiões específicas, como na Baixada Santista, mas também no mundo todo. Caracterizados como contaminantes emergentes, essas substâncias químicas tornaram-se onipresentes em ecossistemas aquáticos (Wang e Wang, 2016). A principal via de introdução desses compostos no meio ambiente decorre do fato de que as estações de tratamento de água e esgoto não são capazes de realizar a remoção desses micropoluentes com eficiência, o que, somado ao descarte inadequado por parte de indústrias farmacêuticas e da própria população, resulta na detecção frequente dessas substâncias nos ambientes hídricos e, consequentemente, gera uma ruptura no ecossistema alvo (Guedes-Alonso *et al.*, 2022; Zhou *et al.*, 2019).

A presença de PPCPs é recorrentemente evidenciada na literatura científica por meio de estudos que visam compreender os impactos desses resíduos, mesmo em concentrações extremamente baixas, na saúde humana, provenientes do contato e ingestão de águas contaminadas e do consumo da biota marinha. Como o descarte tradicional de efluentes e lodos despeja contaminantes de forma contínua, o risco ecológico relativo para organismos receptores como algas e peixes supera o de muitos poluentes tradicionais (Zhou *et al.*, 2019). Ademais, as consequências desse acúmulo na saúde humana manifestam-se a longo prazo. Destaca-se, por exemplo, a pressão seletiva exercida por resíduos de antibióticos, que impulsiona a resistência bacteriana ambiental e acelera o surgimento de superbactérias refratárias à medicina convencional (Eapen *et al.*, 2024). Adicionalmente, a persistência de fármacos bioativos como moduladores hormonais atua como desreguladora endócrina, estando potencialmente associada a distúrbios reprodutivos e ao aumento da incidência de neoplasias hormônio-dependentes (Koopaei e Abdollahi, 2017). Esse panorama é severamente agravado pelo chamado "efeito coquetel", cuja toxicidade crônica decorrente da interação sinérgica entre diversas substâncias químicas ainda permanece subestimada pelas tecnologias convencionais de tratamento de água, configurando uma severa ameaça epidemiológica contemporânea (Bruce, Pleus e Snyder,

ISSN 2317-1316

2010). Diante disso, a avaliação dos riscos ambientais de sistemas secundários e terciários torna-se uma linha de investigação crítica (Chen *et al.*, 2021).

Dentre os PPCPs frequentemente detectados em matrizes aquáticas e que ilustram essa problemática, destaca-se no presente estudo o atenolol. Desenvolvido originalmente pela Alvogen Malta sob o nome comercial Tenormin e aprovado pela FDA em 1981, o atenolol consolidou-se como um dos betabloqueadores cardiosseletivos mais prescritos no mundo para o manejo de hipertensão, angina de peito e arritmias. Quimicamente classificado como um composto de etanolamina, esse fármaco atua como antagonista beta-adrenérgico e agente simpatolítico. Contudo, devido à sua excreção contínua e ao elevado consumo diário, o atenolol passou a figurar também como um persistente contaminante ambiental (National Center for Biotechnology Information, 2026).

Paralelamente, a cafeína, que é uma droga da classe das metilxantinas que possui diversos efeitos farmacológicos, como ação diurética e estimulante, sendo uma das substâncias psicoativas mais consumidas no mundo, também se destaca no presente estudo. Além de poder ser produzida sinteticamente, essa substância natural está presente em mais de 60 espécies de plantas além de ser utilizada em diferentes produtos, como bebidas (café, chás, energéticos e refrigerantes), produtos alimentícios e produtos farmacêuticos (medicamentos para resfriados, analgésicos, suplementos diuréticos e estimulantes). Apresenta relativa estabilidade sob diferentes condições ambientais (como salinidade, luz e temperatura), alta solubilidade em água e longa meia-vida, variando de 100 a 240 dias até cerca de 10 anos, dependendo das características do ambiente aquático. Essas propriedades, associadas ao amplo e crescente consumo com aumento de sua entrada no ambiente, têm contribuído para sua detecção crescente em águas doces, estuários e ecossistemas marinhos (Diogo *et al.*, 2023).

Nesse cenário, a fitorremediação desponta como uma tecnologia promissora para aprimorar e refinar o desempenho do tratamento de águas residuais existentes, utilizando o metabolismo vegetal para a degradação e a remoção de xenobióticos (Iori *et al.*, 2013). Visto que a maior parte das pesquisas sobre o aprimoramento da remoção de PPCPs por vias laboratoriais (como fotodegradação e ozonização) ainda apresenta resultados insatisfatórios ou caros para o esgoto real (He *et al.*, 2024), o uso de macrófitas aquáticas tolerantes surge como uma resposta viável.

ISSN 2317-1316

Este trabalho justifica-se pela urgência em desenvolver soluções biotecnológicas acessíveis e ecologicamente viáveis para conter o avanço de micropoluentes nos corpos hídricos, gerando dados sobre a capacidade adaptativa de macrófitas frente a resíduos farmacêuticos e mitigando riscos à saúde pública e ao ecossistema.

Atualmente, a planta *Pontederia crassipes* vem sendo amplamente estudada para a despoluição de diferentes tipos de contaminantes devido à sua robustez, rápido crescimento e alta capacidade de bioacumulação, apresentando-se como uma candidata ideal para sistemas naturais voltados à remoção do atenolol e cafeína, uma vez que diversos estudos comprovam a eficácia na extração de diferentes tipos de poluentes, incluindo metais pesados, alguns tipos de explosivos e outras substâncias, como material orgânico e inorgânico presente em águas (Gupta *et al.*, 2012; Rezania *et al*., 2016a; Rezania *et al*., 2016b; Dhir *et al.* 2009)

O presente estudo tem como objetivo avaliar a eficiência da fitorremediação da planta *P. crassipes* nos fármacos poluentes atenolol e cafeína em águas contaminadas, avaliando a capacidade de tolerar e reduzir significativamente as concentrações destes contaminantes em ecossistemas hídricos por meio de mecanismos de fitodegradação ou fitoacumulação, sem sofrer danos severos em suas respostas fisiológicas.

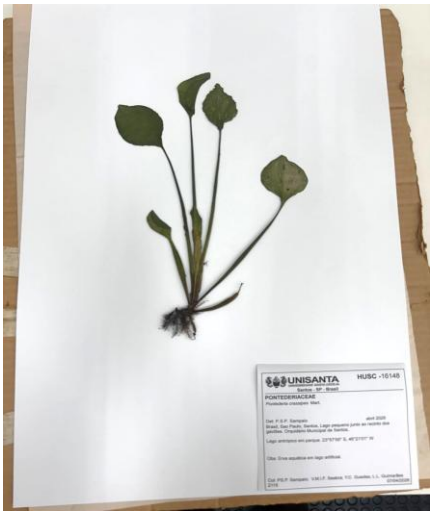
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Coleta da Macrófita

Os indivíduos de *P. crassipes* Mart. foram coletados no lago do Orquidário Municipal de Santos, SP (23º57’55” S; 46º21’01” W), mediante autorização prévia da administração do parque. Foram selecionados exemplares visualmente saudáveis, que apresentavam folhas íntegras, coloração verde característica e sistema radicular preservado. Para confirmação taxonômica, uma amostra botânica foi processada e depositada como exsicata no Herbário da Universidade Santa Cecília (HUSC), sob o número de registro 16148, conforme mostra a Figura 1. Após a coleta, os espécimes foram transportados para a estufa experimental da UNISANTA, onde foram submetidos a procedimentos de limpeza inicial para remoção de sedimentos e organismos aderidos nas raízes. A escolha da espécie fundamentou-se em sua ampla utilização em estudos de fitorremediação e na elevada capacidade de absorção e remoção de contaminantes presentes em ambientes aquáticos (Dhir *et al.*, 2009; Rezania *et al*., 2016a; Rezania *et al*., 2016b).

ISSN 2317-1316

Figura 1: Exsicata de Pontederia crassipes.



2.2 Manutenção da espécie vegetal

Após a coleta e a limpeza inicial, os indivíduos foram mantidos em sistema estoque contendo água proveniente da mesma fonte utilizada nos experimentos e sem adição de nutrientes ou sedimentos, sob condições de luminosidade natural em ambiente protegido de chuva.

As plantas permaneceram em um período de aclimatação de no mínimo 7 dias antes do início dos experimentos, visando minimizar os efeitos do transporte e da falta de nutrientes. Foram selecionados para os ensaios apenas indivíduos visualmente saudáveis e com sistema radicular preservado. Este procedimento é importante para a eficiência dos processos de fitorremediação, uma vez que a absorção de contaminantes está diretamente relacionada à vitalidade da planta, ao desenvolvimento da biomassa e à atividade do sistema radicular (Rezania *et al*., 2016a).

2.3 Análises químicas de Atenolol e Cafeína

As análises químicas foram realizadas por espectrofotometria. Inicialmente foram registrados os espectros dos padrões de atenolol (Purifarma, São Paulo, SP) e de cafeína (Fagron Brasil, São Paulo, SP) utilizados no presente estudo (190 a 600 nm), utilizando um espectrofotômetro UV-Visível (modelo K37-UVVIS, Kasvi, Pinhais, PR).

ISSN 2317-1316

Para o teste de estabilidade e para a avaliação do potencial de fitorremediação, foram registradas leituras de absorbância das amostras em espectrofotômetro nos comprimentos de onda característicos das substâncias: para o atenolol 224 nm (Bari *et al.*, 2010); e para a cafeína 274,8 nm (Bhawani *et al*., 2015).

2.4 Testes de estabilidade do Atenolol e Cafeína

Previamente aos ensaios de avaliação preliminares do potencial de fitorremediação, foram realizados dois testes de estabilidade (um para o atenolol e outro para a cafeína) na água do ensaio, dentro das condições experimentais propostas neste estudo.

Para esta finalidade, foram preparadas uma solução de atenolol e outra de cafeína (28mg/L cada) na água do ensaio, sendo estas soluções expostas às mesmas condições do ensaio por 72h. Foram retiradas alíquotas diárias (0h, 24h, 48h e 72h) e as leituras registradas para fins de quantificação em espectrofotômetro em 224 nm e 274,8 nm (atenolol e cafeína respectivamente).

Neste protocolo, entende-se como "água do ensaio" a água utilizada para o cultivo da espécie vegetal (água do sistema de abastecimento público da Universidade).

2.5 Avaliação do potencial de fitorremediação

Os sistemas hidropônicos de plantas ficaram distribuídos em aquários de capacidade de 8,5L, sendo 6 aquários totais. Foram preparados 6 litros das soluções de cafeína (56mg/L) e atenolol (12mg/L) para os ensaios com água do sistema de abastecimento público da Universidade (água do ensaio), não colocando a capacidade total do recipiente.

O experimento foi estruturado em grupos de controle e de avaliação do potencial de fitorremediação. Os controles compreenderam aquários contendo apenas a água do ensaio, destinados à padronização da leitura em espectrofotômetro; sistemas com água e planta, voltados à padronização, à observação da qualidade da água e ao monitoramento de possíveis variações de absorbância decorrentes de outros fatores; e sistemas contendo água e fármaco, para padronização e acompanhamento do decaimento natural do fármaco em um tempo de exposição superior ao testado.

A avaliação do potencial de fitorremediação foi realizada em sistemas compostos por planta, água e fármaco, com o intuito de verificar a capacidade da macrófita em absorver o

ISSN 2317-1316

contaminante adicionado. Ao decorrer dos dias, o pH da água foi aferido nos aquários, registrando-se o valor de 5. Os experimentos foram conduzidos no mesmo ambiente, sob condições ambientais compartilhadas, com temperatura registrada entre 27 e 28 °C. Também foram retiradas alíquotas diárias (por 14 dias) de cada um dos aquários para fins de análise (quantificação de atenolol e cafeína).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos dos ensaios de estabilidade dos fármacos (concentração nominal de 28mg/L em ambos) na água do ensaio revelaram que a concentração de atenolol e cafeína se mantiveram estáveis durante todo o tempo de monitoramento, conforme os resultados mostrados na tabela 1, reforçando a viabilidade do uso dessas substâncias para os ensaios de fitorremediação.

Tabela 1. Valores de absorbância (Abs) obtidos no teste de estabilidade

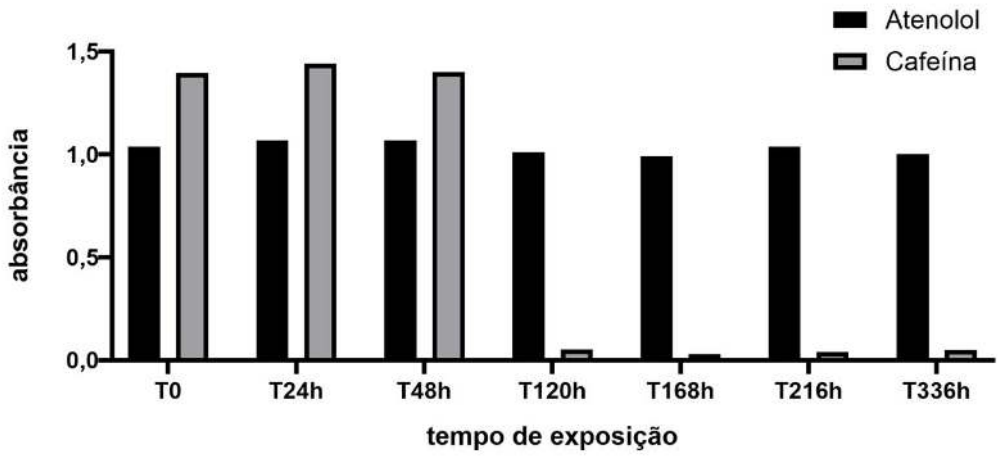
Tempo	**Atenolol (Abs)**	**Cafeína (Abs)**
00h	0,967	1,428
24h	1,086	1,483
48h	1,062	1,471
72h	0,935	1,393

Simultaneamente foram realizados o monitoramento das plantas para traçarmos o perfil de eficiência das macrófitas coletadas, já que apresentaram o caule alongado. Após a observação e pesquisa mais detalhada, concluiu-se que isso se deve ao processo de adaptação destas com o local nativo delas que era mais raso que o padrão do habitat natural delas. Sendo assim, elas se adaptaram por meio de suas raízes para melhor estabilização no ambiente e não geraram risco de comprometimento das análises.

A análise do potencial fitorremediador da *P. crassipes* com os fármacos atenolol e cafeína foram realizadas por meio do monitoramento dos índices de absorbância do meio aquoso ao longo dos dias de experimento. Os resultados obtidos nos diferentes grupos experimentais estão sintetizados na Figura 2.

ISSN 2317-1316

Figura 2: Resultados da avaliação do potencial de fitorremediação



Conforme os resultados da *Figura 2*, o atenolol não apresentou o comportamento esperado, considerando que não houve um decréscimo expressivo nos valores de absorbância ao longo do experimento na presença da macrófita. As macrófitas aquáticas podem atuar na remoção de contaminantes por diferentes mecanismos, incluindo rizofiltração, fitoextração, fitodegradação, fitoestabilização e fitovolatilização. Em *P. crassipes*, o sistema radicular exerce papel fundamental na absorção e retenção de substâncias presentes na coluna d'água, contribuindo para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos (Dhir *et al.,* 2009). Esse resultado está possivelmente associado ao fármaco poder apresentar maior resistência à absorção pelas membranas radiculares ou exigir vias metabólicas complexas, cujo tempo de indução é superior ao período avaliado nestes ensaios.

Conforme Vymazal (2013), a remoção de contaminantes emergentes por macrófitas aquáticas varia drasticamente segundo a classe química do fármaco, evidenciando que compostos mais recalcitrantes (substâncias que resistem à biodegradação e aos processos convencionais de tratamento de água, esgoto ou solos) exigem maior tempo de detenção hidráulica ou interações com substratos específicos para sua degradação. Os achados desta pesquisa confirmam essa premissa, demonstrando que o protocolo atual necessita de adequações para o manejo eficiente do atenolol.

Em contrapartida, os dados da cafeína revelaram um decréscimo da absorbância deste fármaco na presença da *P. crassipes,* ao longo da execução do experimento, evidenciando a remoção progressiva do composto pela planta. Cabe destacar que, os valores de absorbância do controle (cafeína e água) se mantiveram durante os 14 dias de experimento. A redução da

ISSN 2317-1316

concentração de cafeína observada no meio aquoso na presença de *P. crassipes* enquanto o controle contendo água e cafeína manteve valores próximos aos iniciais, sugere um possível potencial da macrófita para contribuir com a remoção desse composto. Entretanto, o delineamento deste estudo preliminar não teve como objetivo identificar os mecanismos responsáveis por essa remoção, que podem envolver a retenção do composto nas raízes, sua absorção pelos tecidos vegetais ou sua transformação por processos biológicos associados à rizosfera (Dhir et al., 2009). Dessa forma, os resultados indicam potencial de *P. crassipes* para a remoção de cafeína em meio aquoso e justificam a realização de estudos posteriores voltados à elucidação dos mecanismos envolvidos.

4 CONCLUSÃO

Este estudo cumpriu seu objetivo principal ao avaliar o potencial de fitorremediação utilizando a macrófita aquática *P. crassipes* para a remoção dos fármacos atenolol e cafeína em meio aquoso. Os resultados preliminares não demonstraram o potencial biotecnológico e sustentável esperados da planta com o contaminante atenolol. Contudo, após apresentar atividade remediadora para a cafeína, *P. crassipes* pode representar uma nova alternativa para o tratamento de efluentes contaminados por fármacos. Agradecemos à Universidade Santa Cecília e aos apoiadores e orientadores Dra. Luciana Lopes Guimarães e Dr. Paulo de Salles Penteado Sampaio pelo suporte institucional e técnico imprescindível para a realização deste estudo.

5 DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Declaração de Uso de IA: Durante a elaboração deste trabalho, utilizou-se a ferramenta Gemini para revisão ortográfica e gramatical. O conteúdo gerado foi revisado, editado e validado pelos autores, que assumem total responsabilidade pelo texto final.

6 REFERÊNCIAS

Ahmad Bhawani, S.; Fong, S. S.; Mohamad Ibrahim, M. N. Spectrophotometric analysis of caffeine. International Journal of Analytical Chemistry, v. 2015, n. 1, p. 1-7, 170239, 2015.

ISSN 2317-1316

Bari, S. et al. Spectrophotometric method for simultaneous estimation of atenolol in combination with losartan potassium and hydrochlorothiazide in bulk and tablet formulation. Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences, v. 2, n. 4, p. 372-375, out. 2010.

Bruce, G. M.; Pleus, R. C.; Snyder, S. A. Toxicological relevance of pharmaceuticals in drinking water. Environmental Science & Technology, v. 44, n. 14, p. 5619-5626, 2010.

Chen, Z. et al. Environmental impact of the effluents discharging from full-scale wastewater treatment plants evaluated by a hybrid fuzzy approach. Science of The Total Environment, v. 790, p. 148212, 2021.

Dhir, B.; Sharmila, P.; Saradhi, P. P. Potencial das macrófitas aquáticas na remoção de contaminantes do meio ambiente. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 39, n. 9, p. 754-781, 2009.

Diogo, B. S. et al. Insights into environmental caffeine contamination in ecotoxicological biomarkers and potential health effects of *Danio rerio*. Heliyon, v. 9, n. 9, e19875, 2023.

Eapen, J. V. et al. A review of the effects of pharmaceutical pollutants on humans and aquatic ecosystem. Exploration of Drug Science, v. 2, p. 484-507, 2024.

Guedes-Alonso, R. et al. Removal of pharmaceuticals in a macrophyte pond-constructed wetland system and the effect of a low effluent recirculation. Water, v. 14, n. 15, p. 2340, 2022.

Gupta, P.; Roy, S.; Mahindrakar, A. B. Treatment of water using water hyacinth, water lettuce and vetiver grass - a review. Resources and Environment, v. 2, n. 5, p. 202-215, 2012.

He, D. C. et al. Research progress on pollution characteristics, degradation, and transformation of typical PPCPs in the process of wastewater treatment. Huan Jing Ke Xue, v. 45, n. 6, p. 3247-3259, jun. 2024.

Iori, V. et al. Growth, physiological response and phytoremoval capability of two willow clones exposed to ibuprofen under hydroponic culture. Journal of Hazardous Materials, v. 262, p. 796-804, 2013.

Koopaei, N. N.; Abdollahi, M. Health risks associated with the pharmaceuticals in wastewater. DARU Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 25, 10.1186/s40199-017-0176-y, 2017.

National Center for Biotechnology Information (NCBI). PubChem Compound Summary for CID 2249, Atenolol. Bethesda, MD: National Library of Medicine, 2026.

Pubchem. Atenolol. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2249 . Acesso em 16.10.26.

Rezania, S. et al. Effectiveness of *Eichhornia crassipes* in nutrient removal from domestic wastewater based on its optimal growth rate. Desalination and Water Treatment, v. 57, n. 1, p. 360-365, 2016a.

ISSN 2317-1316

Rezania, S. et al. The efficient role of aquatic plant (water hyacinth) in treating domestic wastewater in continuous system. International Journal of Phytoremediation, v. 18, n. 7, p. 679-685, 2016b.

Vymazal, J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: a review. Ecological Engineering, v. 61, p. 582-592, 2013.

Wang, J.; Wang, S. Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from wastewater: a review. Journal of Environmental Management, v. 182, p. 620-640, nov. 2016.

Zhang, D. Q. et al. Nutrient removal in tropical subsurface flow constructed wetlands under batch and continuous flow conditions. Journal of Environmental Management, v. 96, n. 1, p. 1-6, 2012.

Zhou, Y. et al. Which type of pollutants need to be controlled with priority in wastewater treatment plants? Traditional or emerging pollutants. Environment International, v. 131, p. 104979, 2019.