

Zonas húmidas naturais e construídas como soluções baseadas na natureza

para a manutenção da boa qualidade da água dos ecossistemas aquáticos.

CATEGORIA

Artigo

CITAÇÃO

Almeida, C. M. R. (2025)

Zonas húmidas naturais e construídas como soluções baseadas na natureza,

Rev. Ciência Elem., V13(01):007.

doi.org/10.24927/rce2025.007

EDITOR

João Nuno Tavares

Universidade do Porto

EDITOR CONVIDADO

Alexandre Lopes Magalhães

Universidade do Porto

RECEBIDO EM

17 de fevereiro de 2025

ACEITE EM

17 de fevereiro de 2025

PUBLICADO EM

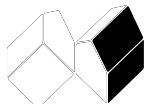
25 de março de 2025

COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2025.

Este artigo é de acesso livre, distribuído sob licença Creative Commons com a designação [CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite a utilização e a partilha para fins não comerciais, desde que citado o autor e a fonte original do artigo.

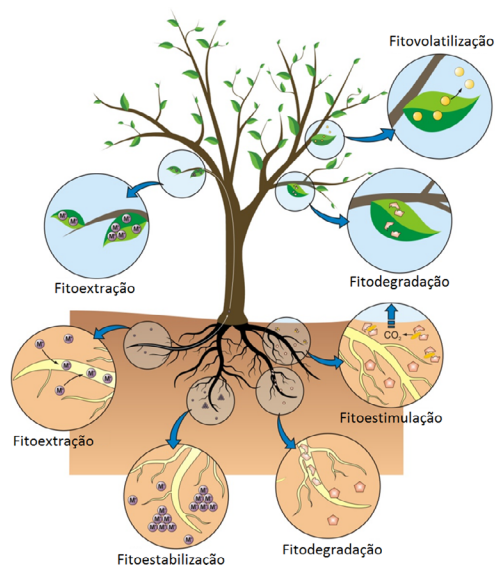
rce.casadasciencias.org



C. Marisa R. Almeida

CIIMAR | DQB/ FC/ U. Porto

As zonas húmidas naturais e construídas são, por excelência, Soluções Baseadas na Natureza (SbN) que contribuem para a manutenção da boa qualidade da água dos ecossistemas aquáticos, complementando com diversos outros benefícios (por exemplo, promoção da biodiversidade) e providenciando diversos serviços. A pressão da contaminação pode ser assim minorada, sendo, porém, imperativo adotar uma abordagem sistémica integrada, da fonte ao mar, na qual as zonas húmidas podem e devem ter um papel relevante. Integradas de forma holística, a implementação de SbN em sistemas hídricos contribuirá certamente para reduzir o impacto dos poluentes nas águas doces e marinhas.



As soluções baseadas na natureza (SbN) têm sido utilizadas há vários anos para melhorar a qualidade da água, reduzindo a emissão de matéria orgânica e nutrientes no meio aquático. Recentemente, estas soluções têm sido também implementadas para mitigar a disseminação de contaminantes persistentes e emergentes. As SbN não se limitam a ser uma infraes-

trutura verde, sendo definidas como “soluções vivas” inspiradas na natureza para enfrentar os vários desafios sociais de forma eficiente quer em termos de recursos quer adaptabilidade, proporcionando simultaneamente benefícios económicos, sociais e ambientais. De facto, as SbN são soluções de engenharia concebidas para incorporar mais natureza nos ambientes urbanos, recreativos e marítimos, tirando partido dos ecossistemas naturais e das suas funções e serviços. As SbN estão integradas nos sistemas naturais e beneficiam múltiplas partes interessadas, sendo simultaneamente rentáveis, resilientes, adaptáveis e sustentáveis. Embora apresentem desafios, as SbN oferecem múltiplas vantagens que podem beneficiar toda a sociedade, contribuindo para a Agenda 2030 os [Objetivos de Desenvolvimento Sustentável](#).

As SbN contribuem diretamente para o *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável* (ODS) 6, relativo a “Água potável e saneamento”, mas os serviços ecossistémicos prestados pelas zonas húmidas são transversais a outros ODS, como o ODS 1 (erradicar a pobreza), ODS 2 (erradicar a fome), ODS 12 (produção e consumo responsáveis) e ODS 13 (ação climática). Adicionalmente, considerando a aplicação das SbN e a sua localização, é possível contribuir com benefícios para os ODS 3 (saúde e bem-estar), ODS 7 (energia renováveis e acessíveis), ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis), ODS 14 (proteger a vida marinha) e ODS 15 (proteger a vida terrestre).

A pressão de contaminação, resultante de factores como a eutrofização, a presença de contaminantes emergentes e persistentes, o lixo marinho e os agentes patogénicos, tem vindo a aumentar de forma notória nos ecossistemas marinhos e de água doce. As zonas costeiras e os estuários constituem, por exemplo, alguns dos ecossistemas mais afetados pelos microplásticos (MPs) provenientes, sobretudo, de fontes terrestres¹ e a presença de fármacos em estuários tem também sido reportada². Esta contaminação pode ter efeitos adversos nos organismos, incluindo a diminuição da reprodução, com potenciais impactos negativos na sustentabilidade das suas populações, e perdas económicas significativas nos serviços dos ecossistemas³. Acresce a isto a ausência de informação sobre a ocorrência e os efeitos de muitos produtos químicos, em particular dos contaminantes emergentes, devido ao seu potencial para causar efeitos adversos nos animais aquáticos⁴. Tal impõe também desafios às autoridades reguladoras para o desenvolvimento ou aplicação de políticas eficazes que limitem a emissão destes compostos e os seus impactos no ambiente aquático. Tais contaminantes podem ter um impacto negativo quer nos ecossistemas de água doce quer nos ecossistemas marinhos, pelo que para a sua mitigação é necessária uma abordagem integrada desde a fonte até ao mar, a abordagem “*from source-to-sea*”.

Nos anos mais recentes, diversas tecnologias com um elevado potencial de mitigação da contaminação química em sistemas aquáticos têm suscitado um interesse crescente. Entre estas tecnologias destacam-se as SbN, que se apresentam como uma solução económica e eficaz a longo prazo. Nesse sentido, é possível aplicar diferentes abordagens, como as zonas húmidas naturais e construídas.

Conforme indicado pelo secretariado da convenção de [Ramsar](#), “as zonas húmidas incluem uma grande variedade de *habitats* como pântanos, turfeiras, planícies aluviais, rios e lagos, e zonas costeiras como sapais, mangais e pradarias de ervas marinhas, mas também recifes de coral e outras zonas marinhas com uma profundidade não superior a seis metros na maré baixa, bem como zonas húmidas criadas pelo homem, como lagoas e reservatórios de tratamento de águas residuais” (FIGURA 1).

As zonas húmidas naturais são utilizadas como locais de descarga não controlada de diferentes fontes de águas residuais há longa data, devido ao seu papel na melhoria da qualidade da água. Atualmente, os estuários são, na maioria dos casos, recetores de contaminantes provenientes de múltiplas fontes resultantes das atividades que decorrem a montante e nas suas margens.

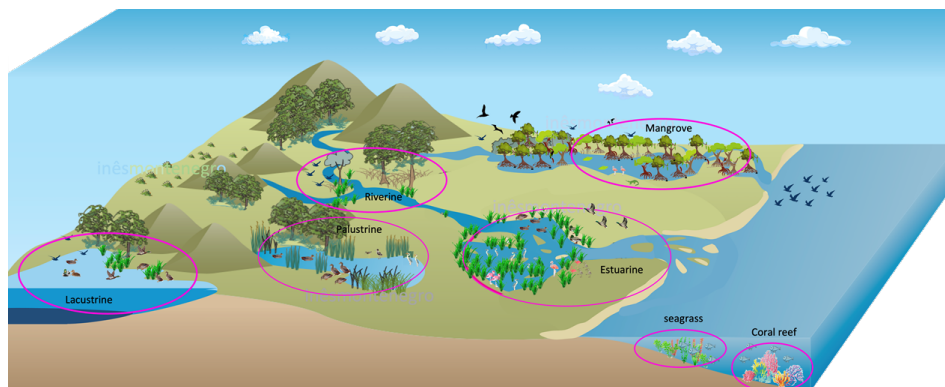
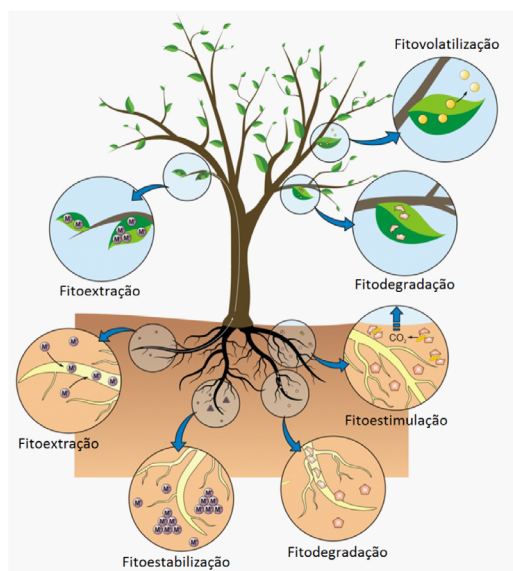


FIGURA 1. Representação de diferentes zonas húmidas⁵.

Porém, os sapais existentes nestas zonas estuarinas podem atuar como filtros. Por exemplo, a remoção de contaminantes pelos sapais pode assegurar a manutenção ou melhoria da qualidade da água e dos sedimentos estuarinos. As plantas de sapal e as comunidades microbianas a elas associadas, nomeadamente os existentes na rizosfera (zona envolvente dos tecidos radiculares da planta) têm demonstrado potencial para reter/remover diferentes contaminantes, por exemplo, metais, hidrocarbonetos de petróleo e alguns fármacos e microplásticos^{6, 7, 8, 9, 10}, atuando como uma barreira à dispersão destes compostos no ambiente aquático. A biorremediação e a fitorremediação estão na base dos principais processos que ocorrem nestes ecossistemas.

A fitorremediação, consiste na utilização de espécies vegetais (árvores, arbustos, gramíneas e plantas halófitas, entre outras) e dos microrganismos associados à sua rizosfera para remover, degradar ou isolar substâncias nocivas do ambiente. A etimologia da palavra fitorremediação é composta pelo grego *phyton*, que significa "planta", e pelo latim *remedium*, que significa "remediar" ou "corrigir". Em comparação com a remediação clássica, a fitorremediação apresenta várias vantagens, nomeadamente: (i) é economicamente mais viável, utilizando os mesmos instrumentos e materiais que a agricultura; (ii) é menos disruptiva para o ambiente e não implica necessariamente que novas comunidades vegetais recolonizem o local; (iii) não são necessários locais extra de deposição; (iv) é mais suscetível de ser aceite pelo público, uma vez que é esteticamente mais agradável do que os métodos tradicionais; (v) evita a escavação e o transporte do material contaminado, reduzindo assim o risco de dispersão da contaminação, e tem potencial para tratar locais contaminados com mais de um tipo de contaminante. Todavia, apresenta algumas desvantagens, nomeadamente a sua dependência (i) das condições necessárias para o crescimento da planta (i.e., clima, geologia, altitude, temperatura), e (ii) da tolerância da planta ao contaminante. Acresce ainda que o tempo necessário para remediar os locais no geral excede o de outras tecnologias mais convencionais e a solubilidade do contaminante tem de ser controlada para evitar a possibilidade de lixiviação, o que poderá levar a maiores danos ambientais.

As técnicas de fitorremediação incluem diferentes estratégias, que podem decorrer simultaneamente, dependendo da estrutura química e das propriedades do contaminante e das características da planta (FIGURA 2).



- ❖ **Fitoextração** (acumulação de metais ou contaminantes orgânicos nas folhas, caules e raízes)
- ❖ **Fitoestabilização** (imobilização dos contaminantes nas raízes ou no solo)
- ❖ **Fitodegradação** (degradação dos contaminantes orgânicos por ação enzimática)
- ❖ **Fitovolatilização** (volatilização dos contaminantes através das folhas, transformando-os em formas menos tóxicas (ex. Hg))
- ❖ **Fitofiltração** (utilização das plantas para remover contaminantes da água, muito usada para substâncias radioativas)
- ❖ **Fitoestimulação** (estimulação dos microrganismos degradadores de contaminantes orgânicos)

FIGURA 2. Estratégias de fitorremediação (adaptado de Favas et al.¹¹).

A simbiose entre plantas e microrganismos presentes na sua rizosfera pode também ser vantajosa para potenciar a fitorremediação (protegendo a planta dos efeitos nocivos dos contaminantes) ou estimular a rizodegradação (a exsudação de compostos pelas raízes das plantas suporta uma comunidade microbiana diversa e resiliente). A rizodegradação (também designada por fitoestimulação ou biorremediação assistida por plantas) é a decomposição de contaminantes orgânicos por microrganismos que vivem no meio e que é reforçada pela presença da rizosfera. De facto, os exsudados das raízes das plantas, tais como açúcares, álcoois e ácidos orgânicos, atuam como fontes de hidratos de carbono para a microflora do solo e aumentam o crescimento e a atividade microbiana. Por exemplo, as plantas de sapal *P. australis* e *J. maritimus* potenciaram a degradação de hidrocarbonetos em sedimentos estuarinos pelos microrganismos¹⁰. Por outro lado, os microrganismos podem estimular a fitoextração e a fitoestabilização de metais¹².

Apesar do extenso conhecimento sobre a fitorremediação e o seu potencial como ferramenta biotecnológica, bem como sobre o potencial das plantas de sapal para contribuir para a boa qualidade das águas superficiais, é importante identificar estratégias para potenciar a fitorremediação em zonas estuarinas e costeiras, para promover o papel das zonas húmidas naturais como SbN relevantes.

Tirando partido do conhecimento adquirido sobre zonas húmidas, as zonas húmidas construídas são por excelência uma SbN, sendo dos sistemas mais frequentemente implementadas. Estes sistemas recorrem, tal como nas zonas húmidas naturais, a processos naturais envolvendo o solo/substrato, a vegetação e os microrganismos associados, tendo como objetivo o tratamento de águas residuais ou outros tipos de água contaminada.

A volatilização, a fitodegradação, a sorção e a sedimentação, a absorção pelas plantas e a degradação microbiana são processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em simultâneo, contribuindo para a eliminação de vários tipos de compostos¹³ (FIGURA 3).

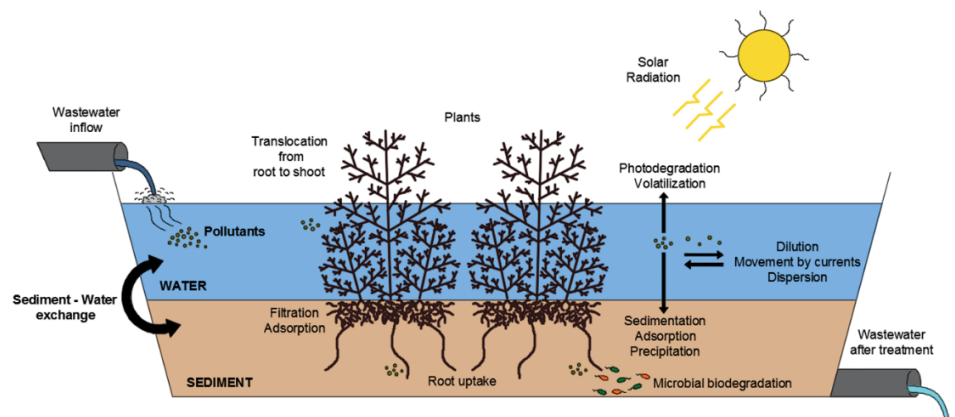


FIGURA 3. Principais processos de remoção de contaminantes em zonas húmidas construídas¹³.

A volatilização está relacionada com a pressão de vapor dos compostos, pelo que os poluentes com valores de pressão de vapor mais elevados têm maior probabilidade de volatilizar, apresentando meias-vidas mais curtas. A fotodegradação é influenciada pela variação sazonal da intensidade luminosa e pelo espectro de absorção específico de cada composto. A sorção no solo/substrato, nas superfícies minerais e nos biofilmes é afetada pelas propriedades físico-químicas dos compostos. Geralmente, os compostos hidrofóbicos (partição octanol-água (K_{ow}) elevado) podem ser facilmente adsorvidos no substrato, enquanto os compostos hidrofílicos (K_{ow} baixo) são maioritariamente removidos por outros processos. O mecanismo de adsorção depende de vários fatores, incluindo as características do adsorvente, o pH, a temperatura, a força iónica e a presença de co-solutos. A seleção de um material com elevada capacidade de adsorção é crucial para otimizar o desempenho sistema. Os substratos mais comumente utilizados incluem por exemplo, areia, gralilha, argila expandida ou pedra de lava. Os resíduos resultantes da agricultura ou de outras atividades, incluindo a cortiça e o carvão produzido a partir desses resíduos, estão também a ser atualmente testados.

A absorção pelas plantas é influenciada pelas características físico-químicas dos contaminantes, nomeadamente o K_{ow} , o pK_a e a sua concentração. Em geral, os compostos com um $\log K_{ow}$ entre 0,5 e 3, são facilmente absorvidos. A seleção da espécie das plantas constitui outro parâmetro fundamental para o funcionamento das zonas húmidas construídas, uma vez que as plantas apresentam uma capacidade variável de absorção de nutrientes e de oxigenação do solo (podendo também libertar oxigénio a partir das suas raízes), interferindo igualmente no funcionamento e estrutura das comunidades microbianas. As espécies mais comuns são a *Typha spp.* e a *Phragmites spp.*. Porém, para a remoção de contaminantes orgânicos, tal como nas zonas húmidas naturais, é essencial uma boa comunidade microbiana, desempenhando as plantas um papel secundário. São, no entanto, essenciais para manter a porosidade do meio e evitar a colmatação do substrato, bem como para manter um ambiente aeróbio mais favorável à degradação microbiana dos contaminantes. A natureza e a magnitude da degradação microbiana estão estreitamente relacionadas com as propriedades físico-químicas do contaminante, estando a metabolização dependente, no geral, da presença de oxigénio e da disponibilidade de outros aceitadores de eletrões (processos aeróbios ou anaeróbios).

As zonas húmidas construídas são uma abordagem de baixa tecnologia com objetivos específicos de tratamento de águas contaminadas de forma controlada e otimizada, inspirada

nos processos naturais das zonas húmidas naturais. Podem ser utilizadas para o tratamento primário, secundário e terciário de águas residuais urbanas/municipais ou domésticas, águas pluviais, águas residuais agrícolas (por exemplo, lixiviados de aterros sanitários, águas residuais da pecuária) ou águas residuais industriais (por exemplo, petroquímica, pasta de papel e papel, resíduos alimentares e indústrias mineiras), entre outras. Através de uma ação combinada entre plantas, microrganismos e componentes do substrato, é possível diminuir a concentração dos compostos para níveis seguros para a biota/ambiente aquático. A principal desvantagem destes sistemas é a área de superfície necessária por habitante, que a otimização das condições operacionais tem tentado reduzir. No entanto, os baixos custos de funcionamento e manutenção e a facilidade de exploração tornam estes sistemas muito atraentes, por exemplo, para as zonas rurais. Além disso, quando devidamente planeadas, as zonas húmidas construídas podem oferecer oportunidades para recuperar alguns ecossistemas e compensar as perdas significativas de zonas húmidas naturais que se têm verificado em todo o mundo. Além disso, para além da melhoria da qualidade da água e da poupança de energia, as zonas húmidas construídas têm outras características relacionadas com a proteção do ambiente: (i) promovem a biodiversidade, (ii) proporcionam *habitat* para organismos das zonas húmidas e para a vida selvagem e (iii) têm funções climáticas (por exemplo, menor produção de CO₂) e hidrológicas.

As zonas húmidas construídas como SbN também podem ser utilizadas como medidas de gestão em bacias hidrográficas para reduzir, por exemplo, a entrada de sedimentos, nutrientes e poluentes em cursos de água, lagos, águas subterrâneas e águas costeiras. A criação ou recuperação de zonas húmidas, com o objetivo de reinstalar serviços ecossistémicos, pode aumentar a atenuação de certos contaminantes, reduzindo também a sua libertação nos ecossistemas aquáticos¹⁴.

Como anteriormente referido e considerando que as principais fontes de contaminantes estão localizadas no ambiente terrestre ou nas zonas costeiras, é imperativo adotar uma abordagem sistémica integrada da fonte ao mar, incluindo também as zonas estuarinas. Integradas de forma holística, a implementação de SbN em sistemas hídricos contribuirá certamente para reduzir o impacto dos poluentes nas águas doces e marinhas¹⁴. Em Portugal, tal como noutros países da UE, os ecossistemas marinhos e das águas interiores, e os seus ecosserviços, são avaliados e geridos de forma fragmentada, o que dificulta a sua proteção eficaz e exploração sustentável. As abordagens integradas baseadas nos ecossistemas são, assim, vitais para atingir os objectivos da Diretiva-Quadro da Água (DQA) e da Diretiva da Estratégia Marinha (DQEM), elevando e mantendo os sistemas do NW português ao seu "Bom Estado Ambiental".

A aplicação de SbN tornar-se-á cada vez mais imperativa nos próximos anos devido aos custos económicos do tratamento convencional da água e à necessidade de renaturalizar os ecossistemas. Será ainda necessário aumentar a base de conhecimentos sobre a eficácia das SbN na redução dos riscos associados a poluentes persistentes e emergentes, na redução de custos (menores custos operacionais e investimentos através da aplicação de SbN de tratamento de águas residuais eficientes em termos de custos e energia) e nas vantagens sociais (ecossistema melhorado e sustentável e proteção pública). Mas a sua implementação contribuirá seguramente para a missão estratégica *Poluição Zero do Horizonte Europa* e para a nova *Lei Europeia do Restauro da Natureza*, a ser também implementada a nível nacional.

Agradecimentos.

Projecto Mar2Protect (GA n.º 101082048) financiado pela União Europeia, Horizonte Europa e CIIMAR UIDB/04423/2020, UIDP/04423/2020 e LA/P/0101/2020 financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia por fundos nacionais.

REFERÊNCIAS

- ¹ RODRIGUES, S. M. et al., [Microplastics contamination in an urban estuary: abundance and distribution of microplastics and fish larvae in the Douro estuary](#), *Science of the Total Environment*, 659, 1071-1081. 2019.
- ² GORITO, A. M. et al., [Occurrence of micropollutants in surface waters: monitoring of Portuguese Lima and Douro River estuaries and interconnecting northwest coast](#), *Marine Pollution Bulletin – Baseline*, 209, 117140. 2024.
- ³ MIRANDA, T. et al., [Neurotoxicity, Behavior, and Lethal Effects of Cadmium, Microplastics, and Their Mixtures on Pomatoschistus microps Juveniles from Two Wild Populations Exposed under Laboratory Conditions Implications to Environmental and Human Risk Assessment](#), *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(16), 2857. 2019.
- ⁴ OROPESA A. L. & GUIMARÃES L., [Occurrence of Levonorgestrel in Water Systems and Its Effects on Aquatic Organisms: A Review. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology \(Continuation of Residue Reviews\)](#), Springer, Cham. 2020.
- ⁵ MONTENEGRO, I., [Phytoremediation of phenolic pollutants in natural and constructed wetlands](#), Tese de Doutoramento em Ciências e Tecnologias do Ambiente, pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 2022.
- ⁶ ALMEIDA, C. M. R. et al., [The role of estuarine wetlands \(saltmarshes\) in sediment microplastics retention](#), *Water*, 15, 1382. 2023.
- ⁷ DIAS, S. et al., [Potential of an estuarine salt marsh plant \(Phragmites australis \(Cav.\) Trin. Ex Steud\) for phytoremediation of bezafibrate and paroxetine](#), *Hydrobiologia*, 848(14), 3291-3304. 2020.
- ⁸ FERNANDES, J. P. et al., [Potential of bacterial consortia obtained from different environments for bioremediation of paroxetine and bezafibrate](#), *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 103881. 2020.
- ⁹ CUNHA, P. et al., [Saltmarsh plants role in metals retention and the potential of vegetation for metal removal in the long term](#), *Nature-Based Solutions*, 5, 100110. 2024.
- ¹⁰ RIBEIRO H. et al., [Salt marsh sediment characteristics as key regulators on the efficiency of hydrocarbons bioremediation by Juncus maritimus rhizospheric bacterial community](#), *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 450-462. 2015.
- ¹¹ FAVAS, P. J.C. et al., [Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora](#), In: *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, Edited by Maria C. Hernandez Soriano. 2014.
- ¹² ALMEIDA, C. M. R. et al., [Bacterial community dynamic associated with autochthonous bioaugmentation for enhanced Cu phytoremediation of salt-marsh sediments](#), *Marine Environmental Research*, 132, 68-78. 2017.
- ¹³ GORITO, A. M. et al., [A review on the application of constructed wetlands for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern listed in recently launched EU legislation](#), *Environmental Pollution*, 227, 428-443. 2017.
- ¹⁴ PASTOR-LÓPEZ, E. J. et al., [Potential of nature-based solutions to reduce antibiotics, antimicrobial resistance, and pathogens at river catchment level. A critical review](#), *Science of the Total Environment*, 946, 174273. 2024.