



ISSN: 2525-815X

# Journal of Environmental Analysis and Progress

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

10.24221/jeap.8.2.2023.4392.070-085



## Contaminação dos recursos hídricos por micropoluentes emergentes e os possíveis métodos de tratamento para sua remoção

### Contamination of water resources by emerging micropollutants and possible treatment methods for its removing

Renatha Michelly Sabino dos Santos<sup>a</sup>, Raquel Ferreira do Nascimento<sup>b</sup>, José Adson Andrade de Carvalho Filho<sup>b</sup>, Lucas Caitano da Silva<sup>a</sup>, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste-NT/CAA. Avenida Campina Grande, s/n, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru, Pernambuco, Brasil. CEP: 55014-900. E-mail: [renatha\\_michelly@hotmail.com](mailto:renatha_michelly@hotmail.com), [lucas.caitano1@gmail.com](mailto:lucas.caitano1@gmail.com).

<sup>b</sup> UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências-CTG. Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 50740-550. E-mail: [raquelferreiran@gmail.com](mailto:raquelferreiran@gmail.com), [adson.carvalhojr@gmail.com](mailto:adson.carvalhojr@gmail.com), [anderson.paiva@ufpe.br](mailto:anderson.paiva@ufpe.br).

#### ARTICLE INFO

Recebido 27 Jun 2021  
Aceito 08 Mai 2023  
Publicado Dia Mês Ano

#### ABSTRACT

The scarcity of water resources and the increase in contamination levels have been a concern for the entire community. New polluting contaminants were recently detected, in concentrations that vary between  $\text{ng.L}^{-1}$  and  $\mu\text{.L}^{-1}$ , called Emerging Contaminants (ECs). These substances are potentially harmful to the environment and human health and are difficult to remove by conventional water and sewage treatments. Thus, the study aimed to elaborate a narrative review of the main entry routes of ECs in the aquatic environment, the effects caused by the presence of these pollutants in the water, and to present treatment solutions for the removal of these micropollutant compounds. ECs are introduced into water, mainly through anthropogenic sources (landfill leachate and domestic and industrial sewage), and are associated with the feminization of animals, neurological, reproductive, and immunological diseases, reduced diversity of microinvertebrates in rivers, and extinction of birds. Among the treatment methods, the following stand out in the removal of ECs from water: activated carbon, membrane filtration, bank filtration, wetlands, and activated sludge, in addition to advanced oxidative processes. Each of these techniques demonstrates advantages and disadvantages, requiring a more accurate study of the characteristics of the place where the treatment will be implemented, to determine the most appropriate one for that environment.

**Keywords:** Emerging microcontaminants, water pollution, water treatment.

#### RESUMO

A escassez dos recursos hídricos aliada ao aumento nos níveis de contaminação tem sido alvo de preocupação por toda a comunidade. Recentemente, foram detectados novos compostos poluidores, em concentrações que variam entre  $\text{ng.L}^{-1}$  e  $\mu\text{.L}^{-1}$ , denominados de Contaminantes Emergentes (CEs). Essas substâncias são potencialmente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, e dificilmente são removidas pelos tratamentos convencionais de água e esgoto. Assim, o estudo objetivou elaborar uma revisão narrativa sobre as principais rotas de entrada dos CEs no ambiente aquático, os efeitos causados pela presença desses poluentes na água, e apresentar soluções de tratamento para a remoção desses contaminantes micropoluentes. Os CEs são introduzidos na água, sobretudo, por meio de fontes antropogênicas (lixiviados de aterros sanitários e esgotos domésticos e industriais) e estão associados à feminização de animais, doenças neurológicas, reprodutivas e imunológicas, redução da diversidade de microinvertebrados nos rios e extinção de aves. Entre os métodos de tratamento, apresentam destaque na remoção dos CEs da



água: o carvão ativado, filtração por membrana, filtração em margem, *wetlands*, lodos ativados, além dos processos oxidativos avançados. Cada uma dessas técnicas demonstra vantagens e desvantagens, sendo necessário um estudo mais acurado sobre as características do local a ser implantado o tratamento, a fim de determinar a mais adequada àquele ambiente.

**Palavras-Chave:** Microcontaminantes emergentes, contaminação hídrica, tratamento de água.

## Introdução

A escassez dos recursos hídricos associada à crescente contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos têm gerado uma maior preocupação com esses recursos em todo mundo. Com o recente desenvolvimento de técnicas complexas e sensíveis, foi possível identificar substâncias presentes na água em pequenas concentrações.

Atualmente, o termo contaminante ou poluente emergente é o mais usado para se referir a todos os tipos de compostos químicos que foram introduzidos no meio ambiente por meio de qualquer atividade antropogênica e cujos efeitos prejudiciais ao meio ambiente são motivo de preocupação para a humanidade. No entanto, na virada do milênio, o termo contaminante emergente (CE) passou a ser utilizado para abranger compostos de qualquer natureza recentemente encontrados no meio ambiente, sendo utilizado com frequência em publicações científicas (Ramírez-Malule, Quiñones-Murillo & Manotas-Duque, 2020).

Os Contaminantes Emergentes (CEs), têm sido detectados na água em concentrações na ordem de microgramas ( $\mu\text{L}^{-1}$ ) ou nanogramas ( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) por litro (Soares & Leão, 2015). Essas substâncias, embora em níveis mínimos de concentração, são potencialmente tóxicas, e devido ao pouco conhecimento quanto ao efeito relacionado à presença desses compostos na água, para a população e para o meio ambiente, não estão inclusos em programas de monitoramento de qualidade de água dos órgãos de meio ambiente nem em legislações de controle ambiental (Pinho et al., 2017).

Os micropoluentes emergentes podem ser de origem industrial, doméstica, agrícola, hospitalar ou laboratorial. Em geral, essas substâncias se enquadram em três grandes categorias: produtos farmacêuticos (*Pharmaceutical active compounds* - PhACs), produtos de cuidado pessoal (PCPs) ou compostos desreguladores endócrinos (CDEs). Em menor quantidade, eles podem ser classificados como nanomateriais (NMs), metabólitos de CEs, drogas ilegais ou genes manipulados (Gogoi et al., 2018). Essas substâncias podem gerar efeitos adversos ao meio ambiente e à saúde pública, como o aumento da resistência às bactérias patogênicas, toxicidade

do meio aquoso, crescimento dos casos dos mais variados tipos de câncer, genotoxicidade, endometriose, entre outros (Kümmerer, 2010; Aquino, Brandt & Chernicharo, 2013).

Apesar dos impactos negativos resultantes da presença dos micropoluentes na água, no Brasil, ainda não se dispõe de uma legislação específica para essas substâncias. As legislações de potabilidade da água (Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/11), de padrões de classificação dos corpos hídricos (Resolução CONAMA 357/05) e de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA 430/11) não estabelecem limites de micropoluentes emergentes (Brasil, 2005; 2011a; 2011b; Moreira, 2013). Dessa forma, os métodos convencionais de tratamento da água ainda são deficientes na remoção desses compostos. Consequentemente, diversos estudos estão sendo realizados para a identificação de tecnologias alternativas capazes de remover esses contaminantes, como a microaeração em reator anaeróbio (Buarque et al., 2019), adsorção em carvão ativado (Fonseca, 2019), uso de hidróxidos duplos lamelares (Pacheco, Amaral & Canobre, 2019), filtração em margem (Kruć, Dragon & Górski, 2019), *wetlands* (Araújo, Wolff & Carissimi, 2019) e o uso do biocarvão e Processos Oxidativos Avançados (Costa et al., 2018).

Diante do explanado, o objetivo do presente estudo foi elaborar uma revisão bibliográfica sobre as principais rotas de entrada dos CEs no ambiente aquático, os potenciais efeitos causados pela presença dos CEs na água, e apresentar possíveis soluções de tratamento para a remoção desses compostos, indicadas e/ou sugeridas pela maioria dos autores consultados.

## Material e Métodos

Visando uma revisão narrativa da contaminação dos recursos hídricos pelos micropoluentes emergentes, suas rotas de entrada nos corpos de água e os possíveis métodos de remoção desses contaminantes, neste estudo, foram realizadas buscas por artigos científicos nas plataformas digitais: Periódicos CAPES, *Web of Science* e Scielo. Nessas plataformas, as palavras-chave utilizadas para a pesquisa foram “contaminantes emergentes”, “fontes dos microcontaminantes emergentes”, “remoção de micropoluentes”, “carvão ativado”, “filtração por

membrana", "filtração em margem", "wetlands", "lodo ativado", "fotólise de peróxido de hidrogênio", "ozonização" e suas correspondentes em inglês, assim como em combinação, para melhores resultados. Os estudos realizados de 2010 em diante tiveram prioridade.

Diante da análise, foram consultados 121 artigos científicos originados em diversos países de todo o mundo, inclusive do Brasil. Os dados levantados foram predominantemente qualitativos, visto que foram observados os tipos de micropoluentes emergentes detectados nas matrizes aquáticas, os riscos que os micropoluentes emergentes trazem para os seres vivos e para o ecossistema, além das principais metodologias utilizadas na remoção desses compostos da água.

## Resultados e Discussão

### *Contaminação dos recursos hídricos por micropoluentes emergentes*

Os diversos compostos químicos classificados como contaminantes de interesse emergente são definidos como substâncias químicas naturais ou sintéticas, que, embora não sejam monitorados frequentemente, são introduzidos nos ecossistemas e podem causar efeitos adversos ao meio ambiente e/ou à saúde humana (Bilal et al., 2019; Nawaz & Sengupta, 2019; Rasheed et al., 2019). No ambiente aquático, os poluentes emergentes são introduzidos através de várias fontes, incluindo descarga direta de esgoto bruto ou proveniente das estações de tratamento de esgoto (ETE), lixiviado de aterros sanitários e escoamento superficial de áreas urbanas ou agrícolas, onde efluente/lodo tratado são utilizados para fins de irrigação. Entre as fontes mencionadas, as ETEs são de particular interesse, uma vez que descarregam contaminantes emergentes continuamente no meio ambiente (Tran, Reinhard & Gin, 2017).

Além dos PhACs e PCPs, diversas outras substâncias têm sido consideradas como CEs: hormônios, adoçantes, drogas ilícitas, filtros solares e filtros ultravioleta (UV); alquilfenóis e seus derivados; microplásticos; substâncias derivadas do processo de desinfecção das águas; pesticidas; retardantes de chama bromados; nanomateriais; líquidos iônicos e príons; determinados microorganismos e toxinas de algas, dentre outros (Montagner, Vidal & Acayaba, 2017; Rodriguez-Narvaez et al., 2017). Os pesticidas incluem herbicidas, inseticidas e fungicidas e, devido à sua necessidade e ao seu amplo uso, foram reconhecidos como poluentes ambientais significativos (Birch et al., 2015; Fijalkowski, 2019). Com os avanços na indústria química, espera-se que a variedade de compostos liberados

para o meio ambiente, potencialmente prejudiciais aos seres humanos e ao ecossistema, cresça significativamente ao longo dos anos (Rodriguez-Narvaez et al., 2017).

Melhorias na química analítica tornaram possível detectar produtos químicos em concentrações extremamente baixas. Como resultado, o número crescente de substâncias xenobióticas detectadas nas águas superficiais, subterrâneas, solo, tecidos vegetais e em outras amostras ambientais deve-se, em parte, ao aumento da sensibilidade da instrumentação, em vez de um aumento real desses contaminantes (Obergh & Leopold, 2019).

### *Fontes e destinos dos CEs no meio ambiente*

Os CEs, como qualquer outro poluente convencional, resultam de atividades domésticas, comerciais, industriais e agrícolas. As fontes de contaminação podem ser classificadas em dois tipos: fontes pontuais e difusas (Nawaz & Sengupta, 2019).

A descarga da fonte pontual ocorre através de uma localização espacial discreta. Os contaminantes nessas fontes apresentam cargas mais concentradas. Dentre as fontes pontuais, podem ser citados o esgoto municipal, as águas residuais industriais, os lixiviados de aterros sanitários e as descargas de hospitais. As fontes difusas ocorrem em grandes escalas geográficas, por exemplo, escoamento agrícola, escoamento de águas pluviais e linhas de esgoto municipais com vazamento de água subterrânea (Naidu et al., 2016; Nawaz & Sengupta, 2019).

A Figura 1 ilustra uma visão esquemática de algumas das vias pelas quais os CEs são introduzidos no ambiente aquático, baseada no estudo realizado por Lapworth et al. (2012). Além das principais fontes antropogênicas, apresentadas no esquema, também merecem destaque como fonte principal as práticas agrícolas e de criação de animais, dentre elas, espalhamento de esterco, lodo e pesticida em campos agrícolas que resultam na lixiviação de contaminantes para as águas superficiais e subterrâneas. Além disso, hormônios/drogas na urina animal ou excrementos podem estar presentes no efluente agrícola (Montagner, Vidal & Acayaba, 2017; Nawaz & Sengupta, 2019).

O esquema da Figura 1 mostra que os fluxos de águas residuais provenientes de várias fontes antropogênicas estão entre os principais transportadores de CEs para o meio ambiente. A maioria desses efluentes é direcionada para tratamento em ETEs e, subsequentemente, liberada no ambiente, nos recursos hídricos receptores como a água subterrânea e superficial, podendo

atingir o sistema de abastecimento de água potável, chegando aos consumidores. Vários estudos relataram detecções de CEs em amostras de água de ETAs (Glassmeyer et al., 2017; Riva et al., 2018), ETEs (Roberts et al., 2016; Kapelewska et

al., 2018), águas superficiais (Cornwell et al., 2015; Luque-Espinar et al., 2015; Sun et al., 2016; Bai et al., 2018; Williams et al., 2019) e águas subterrâneas (Sorensen et al., 2015; Sharma et al., 2019).

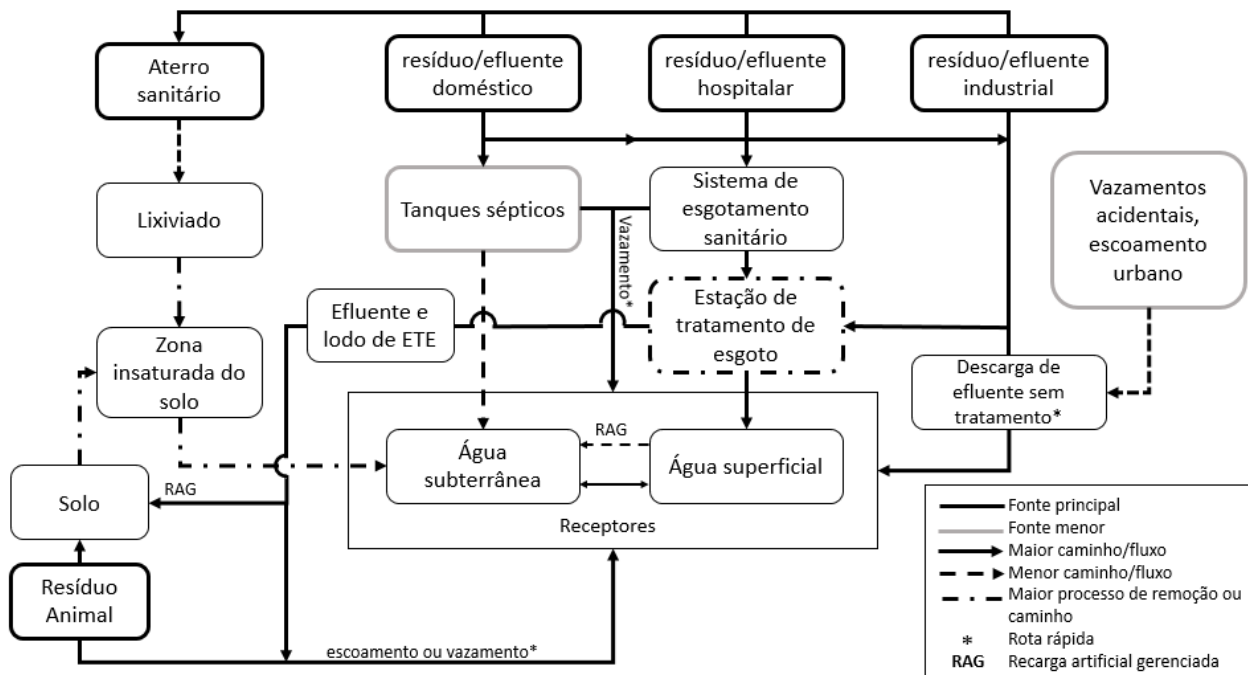


Figura 1. Diagrama esquemático, usando a abordagem fonte-caminho-receptor, destacando fontes e caminhos potenciais para a contaminação das águas superficiais e subterrâneas por Contaminantes Emergentes (CEs). Fonte: Adaptado de Lapworth et al. (2012).

Embora as fontes e receptores sejam conhecidos e definidos, muito pouco se sabe sobre os caminhos dos CEs no ambiente aquático. Isso ocorre devido à pouca informação disponível sobre as propriedades físicas e químicas das espécies-alvo e à complexidade de seu comportamento nos sistemas ambientais, em especial às suas baixas concentrações (Nawaz & Sengupta, 2019).

O destino dos CEs no ambiente aquático está relacionado com as propriedades físico-químicas desses poluentes. Os coeficientes de partição e de adsorção e a hidrofobicidade dos contaminantes, por exemplo, são determinantes na rota dessas substâncias ao adentrar no meio ambiente, em suas mais diversas esferas (aquática, sedimentar e biótica). O pH, a temperatura e a presença de matéria orgânica/particulada interferem na solubilidade do contaminante em água. Outro destino dos CEs é a biomagnificação, processo decorrente da bioacumulação dos contaminantes nos seres vivos (Montagner, Vidal & Acayaba, 2017).

No caso de não degradação ou eliminação dos CEs durante o tratamento de esgoto, no solo ou em outros compartimentos ambientais, esses alcançarão as águas superficiais e subterrâneas e, potencialmente, a água potável. Quando o efluente

da ETE é descarregado em águas superficiais, o CE flui para os receptores de água e também pode se infiltrar nas águas subterrâneas ou permanecer adsorvido no solo e nos sedimentos, dependendo de suas propriedades físico-químicas e de sua interação com a matriz ambiental em que se encontra. Quando um CE ou seu metabólito ou produto de transformação atinge um compartimento ambiental, pode sofrer vários fenômenos, como adsorção, absorção, diluição, hidrólise, fotólise, biodegradação, volatilização, oxidação ou complexação. Cada um desses fenômenos leva à degradação, transformação ou persistência do composto no ambiente (Blum et al., 2018; Lofrano et al., 2020).

Muitos produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais contêm estruturas químicas complexas, geralmente combinadas, sendo as indústrias de fabricação a fonte original desses contaminantes. Porém, ao sair das fábricas prontos para consumos, as rotas de exposição ambiental desses contaminantes se tornam mais complexas, menos compreendidas e diferem entre os ambientes urbano e rural (Wilkinson et al., 2017).

Embora o destino dos contaminantes emergentes esteja sendo investigado, existem poucas avaliações abrangentes em que a

persistência, a mobilidade e a bioacumulação de uma variedade de contaminantes são discutidas em um único contexto (Blum et al., 2018).

### *Riscos dos Contaminantes Emergentes (CEs) ao meio ambiente e à saúde humana*

Embora os CEs estejam atualmente presentes em baixas concentrações nos recursos hídricos e solos, eles representam uma séria ameaça à integridade do ecossistema. Devido ao avanço da ecotoxicologia ambiental nas últimas décadas, os CEs têm sido associados à feminização e a alterações comportamentais em peixes, *imposex*, distúrbios neurológicos, reprodutivos e imunológicos em animais, cânceres, desenvolvimento de genes resistentes a antibióticos em bactérias, obesidade, doenças cardíacas e desenvolvimento de diabetes tipo 2 em humanos, redução da diversidade de microinvertebrados nos rios e extinção de aves, entre outros efeitos ecotoxicológicos. No entanto, para a maioria deles, faltam controles sucintos para a avaliação ecológica de riscos (Lofrano et al., 2020).

Efeitos adversos à saúde humana, com relação à exposição crônica à baixas concentrações de determinadas classes de produtos farmacêuticos (antibióticos, analgésicos, anti-inflamatórios, hormônios, antipiréticos, antidepressores), estão relacionados à problemas como: alteração comportamental, lesão celular, resistência à antibióticos, desregulação endócrina, infertilidade, aumento da pressão arterial (Gaffney et al., 2014). Vários produtos farmacêuticos e de cuidado

peçoal são detectados em ambiente aquático, em baixas concentrações, sendo, muitos deles, biologicamente ativos, podendo impactar organismos não direcionados. Os produtos farmacêuticos foram projetados especificamente para maximizar sua atividade biológica em doses baixas e direcionar certos mecanismos metabólicos, enzimáticos ou de sinalização celular. As implicações tóxicas desses produtos são, então, a principal preocupação desses no meio ambiente (Lofrano et al., 2020).

O uso excessivo dos pesticidas resultou na contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos com essa classe de CE, principalmente em áreas agrícolas (Griffero et al., 2019). De acordo com Bilal, Iqbal & Barceló (2019), os efeitos adversos dos pesticidas podem afetar diferentes sistemas dos seres vivos, como os sistemas endócrino, nervoso, respiratório, reprodutivo e circulatório. Existem evidências de que alguns pesticidas, incluindo resmetrina, cipermetrina, bifentrina, tolilfluanida e metoxicloro, desempenham um papel fundamental nos distúrbios hormonais, afetando o receptor do hormônio glicocorticoide, um fator crítico no sistema endócrino (Fijalkowski, 2019).

A Figura 2 mostra algumas das consequências adversas causadas pela contaminação dos recursos hídricos pelos CEs, conhecidas ou suspeitas, na saúde humana e no meio ambiente, segundo o estudo realizado por Rasheed et al. (2019).



Figura 2. Principais consequências e efeitos adversos dos Contaminantes Emergentes (CEs) sobre a saúde humana e o meio ambiente. Fonte: Adaptado de Rasheed et al. (2019).

De acordo com Nawaz & Sengupta (2019), os dois critérios para a classificação de uma substância como um contaminante emergente são seus potenciais efeitos ecotoxicológicos e à saúde humana, além de sua persistência no meio ambiente. Entretanto, é difícil decifrar e reconhecer as questões ambientais e de saúde relacionadas com materiais perigosos devido à falta de dados com relação ao impacto desses no meio. Ainda assim, são de extrema importância as avaliações de monitoramento e o entendimento do comportamento desses contaminantes no meio ambiente (Bilal et al., 2019).

#### *Métodos de remoção dos micropoluentes emergentes dos recursos hídricos*

Em razão dos possíveis efeitos causados pelos micropoluentes emergentes ao meio ambiente e à saúde humana, tem havido uma crescente preocupação mundial quanto à descoberta de novas tecnologias eficientes na remoção desses compostos associadas ou não às técnicas convencionais. Alguns estudos comprovam que as tecnologias de tratamento convencionais utilizadas em ETAs e ETEs são ineficazes na eliminação completa de uma série de CEs (Reis, 2019; Yadav et al., 2019; Tröger et al., 2020). Segundo Rivera-Utrilla et al. (2013), as ETEs, que geralmente utilizam um sistema primário de tratamento físico-químico com um sistema secundário de tratamento biológico, não são completamente eficazes na remoção de produtos farmacêuticos porque a maioria dessas substâncias não pode ser metabolizada por microrganismos e pode, inclusive, inibir a atividade desses seres ou produzir sua bioacumulação na cadeia alimentar.

Diante desse problema, muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de aumentar a eficiência das técnicas de remediação ou desenvolver novas modalidades de detecção, quantificação e tratamento eficiente desses compostos (Rasheed et al., 2019). As tecnologias não convencionais de tratamento de água mudaram ao longo do tempo, como resultado do desenvolvimento de novas técnicas. Esses tratamentos podem ser amplamente divididos em tecnologias de mudança de fase, tratamento biológico e processos de oxidação avançada (Rodríguez-Narvaez et al., 2017; Rasheed et al., 2019).

Tecnologias capazes de mover contaminantes de uma fase para outra (fase líquida para a fase sólida, por exemplo) têm sido amplamente mencionadas na remoção de contaminantes emergentes. Entre essas técnicas, os processos de adsorção têm sido extensivamente

estudados para a remoção de vários poluentes diferentes (Rodríguez-Narvaez et al., 2017).

De acordo com Rathi & Kumar (2021), os contaminantes emergentes estão cada vez mais ofensivos ao ecossistema, mas a adsorção é uma técnica eficiente na remoção desses compostos da água. As vantagens do tratamento por adsorção incluem a simplicidade de operar e projetar, manuseio de nível micro de poluentes, processos contínuos e descontínuos vigorosos, remoção de toxicidade, baixo custo de investimento, ambientalmente benigno, e probabilidade de reutilização e regeneração de adsorventes (Hubetska, Kobylinska & García, 2020; Rathi & Kumar, 2021). A adsorção ganhou destaque por ser eficaz no tratamento de poluentes dissolvidos que permanecem mesmo após processos de oxidação química ou tratamento biológico.

Dentre os compostos que são utilizados para a adsorção, o carvão ativado (CA) é o material mais utilizado devido à sua alta porosidade e área superficial específica (Rodríguez-Narvaez et al., 2017). Essas características fazem do CA um material altamente adsorptivo e eficaz na remoção de uma variedade de contaminantes (Ek et al., 2014; Hubetska, Kobylinska & García, 2020; Tröger et al., 2020).

Existem vários processos biológicos disponíveis para tratamento dos CEs, como o uso do lodo ativado (Wang & Wang, 2017), sendo o sistema mais comumente utilizado devido à sua eficácia. Outros sistemas biológicos, como filtração do solo ou filtração biológica, apresentaram resultados interessantes na remoção de CEs (Rodríguez-Narvaez et al., 2017). A tecnologia de Filtração em Margem, que também pode ser considerada um processo biológico, consiste na locação de poços próximos a um manancial superficial no qual a ação do bombeamento nesses poços gera uma indução do fluxo de água do manancial, através do meio poroso, até o poço de produção. Nessa passagem da água pelo solo, ocorrem diversos processos físicos, químicos e biológicos que influenciam na atenuação de poluentes existentes na água (Freitas et al., 2017).

Outro processo biológico natural que vem ganhando destaque nos estudos de remoção dos CEs em corpos d'água são os *wetlands* construídos, também conhecidos como Sistemas Alagados Construídos (SACs). Esse sistema é considerado uma tecnologia natural utilizada no tratamento de águas residuais e efluentes. Pode ser dividida em três zonas: zona de entrada, composta por brita e/ou material similar; zona principal, composta por cascalhos, britas e/ou materiais similares, onde a água residual escoar de forma lenta através do meio

poroso e ocorrem as maiores taxas de atenuação dos poluentes; e, por fim, a zona de saída, localizada na outra extremidade da zona de entrada e sendo composta pelo mesmo material (Von Sperling & Sezerino, 2018). Nos SACs, estão dispostas diferentes espécies de plantas que, segundo Kozak et al. (2014), são determinantes na atenuação dos poluentes devido às suas interações biológicas e os biofilmes formados nos substratos que abrigam variadas formas de microrganismos.

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) também têm, ultimamente, se destacado no tratamento de águas residuárias devido a sua eficiência e por reduzirem os impactos ambientais (Araújo et al., 2016). Esse tipo de tratamento funciona devido à geração de radicais livres reativos, sobretudo o radical hidroxila (OH•), que, além de altamente reativo, é não seletivo, sendo capaz de oxidar e decompor vários compostos, tornando-se uma boa solução para compostos não biodegradáveis (Cuerda-Correa, Alexandre-Franco & Fernández-González, 2019). Esses radicais são formados devido à presença de um oxidante

durante o tratamento. Sendo assim, existem diversos POAs, como a fotólise de peróxido de hidrogênio, que, combinada com a irradiação UV, quebra a molécula de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, formando os radicais hidroxila; a ozonização, quando o ozônio atua na oxidação de contaminantes; fotocatalise heterogênea, que baseia-se na combinação da radiação ultravioleta com um semicondutor, sendo o mais utilizado dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>); e o fenton e foto-fenton, em que os radicais hidroxila são gerados pela decomposição do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na presença de íons Fe(II) em meio ácido (Melo et al., 2009; Borges et al., 2016). Vários estudos comprovaram a eficiência dessas técnicas na remoção de microcontaminantes emergentes (Ferrando-Climent et al., 2017; Monteoliva-García et al., 2019; Moreira, Maldib & Freschia, 2019).

A Tabela 1 apresenta estudos que confirmaram a eficiência de alguns métodos de mudança de fase, tratamento biológico e processos oxidativos avançados na atenuação de contaminantes emergentes da água.

Tabela 1. Estudos sobre eficiência de diferentes técnicas na remoção dos Contaminantes Emergentes (CEs). Fonte: Santos et al. (2021).

Tipo de tecnologia	Técnica de remoção	PhACs	PCPs	Pesticidas
Mudança de fase	Carvão Ativado	Kårelid, Larsson & Björleinius (2017) Delgado et al. (2019) Viegas et al. (2020)	Yang et al. (2011) Ek et al. (2014) Katsigiannis et al. (2015)	Derylo-Marczewska et al. (2017) Derylo-Marczewska et al. (2019) Suo et al. (2018)
	Filtração por Membrana	Fischer et al. (2015) Taheran et al. (2016) Egea-Corbacho, Ruiz & Alonso (2019)	Krzeminski et al. (2017) Benítez et al. (2017) Park, Yamashita & Tanaka (2018)	Karimi, Rahimpour & Kebria (2016) Chen et al. (2022) Fujioka et al. (2020)
Biológicos	Filtração em Margem	Nagy-Kovács et al. (2018) Kruč, Dragon & Górski (2019) Van Driezum et al. (2019)	Alidina, Shewchuk & Drewes (2015) Yang et al. (2017) Valhondo et al. (2020).	Jaramillo et al. (2019) Dragon et al. (2019) Oberleitner et al. (2020)
	Wetlands	Zhang et al. (2018) Petrie et al. (2018) Nivala et al. (2019)	Hijosa-Valsero et al. (2010) Button et al. (2019) Ilyas & Van Hullebusch (2020)	Mahabali & Spanoghe (2014) Lyu et al. (2018) Ignatowicz, Puchlik & Ozowicki (2020)
	Lodo Ativado	Cunha et al. (2017) Wang & Wang (2017) Muter et al. (2017) Min et al. (2018)	Suarez, Lema & Omil (2010) Chen et al. (2015) He et al. (2018)	Jin et al. (2010) Fang et al. (2018) Tazdaït et al. (2018)



Processos Oxidativos Avançados	Fotólise de peróxido de hidrogênio	Nassar et al. (2017) Moreira, Maldi & Freschi (2019) Ledakowicz et al. (2019)	Sato, Kim, & Tanaka (2016) Ríos et al. (2017) Mondal, Adak, & Datta (2019)	Marien et al. (2019) Oliveira et al. (2018) Pérez-Lucas et al. (2020)
	Ozonização	Lee et al. (2019) Szabová et al. (2020) Chu (2020)	Gomes et al. (2017) Arslan et al. (2018) Pauca et al. (2019)	Solís et al. (2019a) Solís et al. (2019b) Pérez-Lucas et al. (2020)

PhACs – *Pharmaceutical active compounds*; PCPs – Produtos de Cuidado Pessoal.

Métodos complementares de remoção de contaminantes emergentes têm sido utilizados em ETEs e ETAs. Esses processos englobam a adoção de um tratamento terciário como ozonização, processos oxidativos avançados (UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, fotocatalise homogênea e heterogênea, entre outros), adsorção em carvão ativado, filtração em membranas e osmose reversa (Montagner, Vidal & Acayaba, 2017). Há vantagens e desvantagens na implantação de um tipo de tratamento terciário em uma ETE ou ETA, que devem ser examinadas, auxiliando, assim, na tomada de decisão com relação ao melhor tipo de tratamento a ser empregado na estação. Além de se conhecer o tipo de efluente a ser tratado (esgoto bruto, efluente industrial ou manancial), é importante projetar o espaço físico e os custos atrelados ao tipo de tratamento, visando atender os objetivos de cada projeto (Montagner, Vidal & Acayaba, 2017).

### Conclusão

Os contaminantes emergentes são introduzidos nos recursos hídricos, sobretudo por meio de fontes antropogênicas, como os lixiviados de aterros sanitários e esgotos domésticos, industriais e hospitalares. Além dessas rotas, em menor proporção, esses compostos também contaminam as matrizes aquáticas por meio de práticas agrícolas, tais como espalhamento de esterco, lodo e pesticida em campos cultiváveis, que culminam no carreamento de poluentes aos mananciais superficiais e subterrâneos.

Embora estejam presentes em concentrações pequenas na água, os micropoluentes podem causar efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente, sendo associados à feminilização de animais, além de possíveis doenças neurológicas, reprodutivas e imunológicas, à redução da diversidade de microinvertebrados nos rios e extinção de aves. E, devido aos recentes avanços na indústria química, é possível que se aumente ainda mais a variedade desses compostos prejudiciais liberados ao meio ambiente.

Embora a investigação da contaminação dos recursos hídricos por micropoluentes esteja

cada vez mais aquecida em todo o mundo, ainda se nota a falta de regulamentação da presença desses produtos nas matrizes aquáticas. A carência de legislação sobre esse aspecto, sobretudo no Brasil, pode ser atribuída à falta de consenso sobre o limite a ser estabelecido para a concentração dos micropoluentes em águas superficiais e residuárias lançadas nos corpos hídricos devido às limitações das pesquisas que analisam os riscos que os contaminantes emergentes trazem ao ecossistema.

Além do problema com a falta de regulamentação, os tratamentos convencionais de água e esgoto, em geral, não são capazes de remover todos os CEs, assim, diversas pesquisas têm investigado possíveis tecnologias capazes de remover esses compostos. Entre os métodos de tratamento, apresentam destaque na remoção dos CEs da água: o carvão ativado, filtração por membrana, filtração em margem, *wetlands*, lodos ativados, além dos processos oxidativos avançados. Cada uma dessas técnicas demonstra vantagens e desvantagens, sendo necessário um estudo mais acurado sobre as características do local a ser implantado o tratamento, a fim de determinar a mais adequada àquele ambiente.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas bolsas de pesquisa para Renatha Michelly Sabino dos Santos, Raquel Ferreira do Nascimento e José Adson Andrade de Carvalho Filho, assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo financiamento de projeto de pesquisa (Processo nº. 421155/2018-3).

### Referências

Alidina, M.; Shewchuk, J.; Drewes, J. E. 2015. Effect of temperature on removal of trace organic chemicals in managed aquifer recharge systems. *Chemosphere*, 122, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.064>



- Aquino, S. F.; Brandt, E. M. F.; Chernicharo, C. A. L. 2013. Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgoto: Revisão da literatura. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 18, (3), 187-204. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000300002>
- Araújo, K. S.; Antonelli, R.; Gaydeczka, B.; Granato, A. C.; Malpass, G. R. P. 2016. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 11, (2), 387-401. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1862>
- Araújo, R. K.; Wolff, D. B.; Carissimi, E. 2019. Fármacos em águas residuárias: efeitos ambientais e remoção em wetlands construídos. *Revista DAE*, 67, (218), 137-155. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.039>
- Arslan, A.; Topkaya, E.; Bingöl, D.; Veli, S. 2018. Removal of anionic surfactant sodium dodecyl sulfate from aqueous solutions by O<sub>3</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process: Process optimization with response surface methodology approach. *Sustainable Environment Research*, 28, (2), 65-71. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.11.002>
- Bai, X.; Lutz, A.; Carroll, R.; Keteles, K.; Dahlin, K.; Murphy, M.; Nguyen, D. 2018. Occurrence, distribution, and seasonality of emerging contaminants in urban watersheds. *Chemosphere*, 200, 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.106>
- Benítez, F. J.; Real, F. J.; Acero, J. L.; Casas, F. 2017. Use of ultrafiltration and nanofiltration processes for the elimination of three selected emerging contaminants: amitriptyline hydrochloride, methyl salicylate and 2-phenoxyethanol. *Environment Protection Engineering*, 43, (3), 125-141. <https://dx.doi.org/10.5277/epe170308>
- Bilal, M.; Adeel, M.; Rasheed, T.; Zhao, Y.; Iqbal, H. M. 2019. Emerging contaminants of high concern and their enzyme-assisted biodegradation - a review. *Environment International*, 124, 336-353. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.011>
- Bilal, M.; Iqbal, H. M.; Barceló, D. 2019. Persistence of pesticides-based contaminants in the environment and their effective degradation using laccase-assisted biocatalytic systems. *Science of the Total Environment*, 695, 133896-133912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133896>
- Birch, G. F.; Drage, D. S.; Thompson, K.; Eaglesham, G.; Mueller, J. F. 2015. Emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, a food additive and pesticides) in waters of Sydney estuary, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 97, (1-2), 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.038>
- Blum, K. M.; Andersson, P. L.; Ahrens, L.; Wiberg, K.; Haglund, P. 2018. Persistence, mobility and bioavailability of emerging organic contaminants discharged from sewage treatment plants. *Science of the Total Environment*, 612, 1532-1542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.006>
- Borges, S. S.; Xavier, L. P.; Silva, A. C. D.; Aquino, S. F. D. 2016. Imobilização de dióxido de titânio em diferentes materiais suporte para o emprego em fotocatalise heterogênea. *Química Nova*, 39, (7), 836-844. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160106>
- Brasil. Ministério da Saúde. 2011a. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Brasília, DF.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. 2005. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. 2011b. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF.
- Buarque, P. M. C.; Lima, R. B. P.; Vidal, C. B.; Buarque, H. L. B.; Firmino, P. I. M.; Santos, A. B. 2019. Enhanced removal of emerging micropollutants by applying microaeration to an anaerobic reactor. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24, (4), 667-673. <https://doi.org/10.1590/s1413-4152201920190030>
- Button, M.; Cosway, K.; Sui, J.; Weber, K. 2019. Impacts and fate of triclosan and sulfamethoxazole in intensified re-circulating vertical flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 649, 1017-1028. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.395>
- Chen, R.; Hu, L.; Zhang, H.; Lin, D.; Wang, J.; Xu, D.; Gong, W.; Liang, H. 2022. Toward emerging contaminants removal using acclimated activated sludge in the gravity-driven membrane filtration system. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129541. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129541>

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129541>

- Chen, X.; Vollertsen, J.; Nielsen, J. L.; Dall, A. G.; Bester, K. 2015. Degradation of PPCPs in activated sludge from different WWTPs in Denmark. *Ecotoxicology*, 24, (10), 2073-2080. <https://doi.org/10.1007/s10646-015-1548-z>
- Chu, L.; Chen, D.; Wang, J.; Yang, Z.; Yang, Q.; Shen, Y. 2020. Degradation of antibiotics and inactivation of antibiotic resistance genes (ARGs) in Cephalosporin C fermentation residues using ionizing radiation, ozonation and thermal treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121058-121056. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121058>
- Cornwell, E. R.; Goyette, J. O.; Sorichetti, R. J.; Allan, D. J.; Kashian, D. R.; Sibley, P. K.; Taylor, D. W.; Trick, C. G. 2015. Biological and chemical contaminants as drivers of change in the Great Lakes-St. Lawrence River basin. *Journal of Great Lakes Research*, 41, 119-130.
- Costa, L. F.; Oliveira, D. G.; Moreira, F. M. S.; Urzedo, A. P. F. M.; Cestarolli, D. T.; Bernardes-Silva, A. C. 2018. Utilização de Biocarvão e Processos Oxidativos Avançados para Remoção do Propranolol de Efluentes Aquosos Simulados. *Revista Virtual de Química*, 10, (2), 295-312. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180023>
- Cuerda-Correa, E. M.; Alexandre-Franco, M. F.; Fernández-González, C. 2019. Advanced Oxidation Processes for the Removal of Antibiotics from Water. An Overview. *Water*, 12, (1), 102. <https://doi.org/10.3390/w12010102>
- Cunha, D. L.; Paula, L. M.; Silva, S. M. C.; Bila, D. M.; da Fonseca, E. M.; Oliveira, J. L. M. 2017. Ocorrência e remoção de estrogênios por processos de tratamento biológico de esgotos. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 12, (2), 249-262. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1992>
- Delgado, N.; Capparelli, A.; Navarro, A.; Marino, D. 2019. Pharmaceutical emerging pollutants removal from water using powdered activated carbon: study of kinetics and adsorption equilibrium. *Journal of Environmental Management*, 236, 301-308. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.116>
- Derylo-Marczewska, A.; Blachnio, M.; Marczewski, A. W.; Seczkowska, M.; Tarasiuk, B. 2019. Phenoxyacid pesticide adsorption on activated carbon—equilibrium and kinetics. *Chemosphere*, 214, 349-360. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.088>
- Derylo-Marczewska, A.; Blachnio, M.; Marczewski, A. W.; Swiatkowski, A.; Buczek, B. 2017. Adsorption of chlorophenoxy pesticides on activated carbon with gradually removed external particle layers. *Chemical Engineering Journal*, 308, 408-418. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2016.09.082>
- Dragon, K.; Drozdzyński, D.; Gorski, J.; Kruc, R. 2019. The migration of pesticide residues in groundwater at a bank filtration site (Krajkowo well field, Poland). *Environmental Earth Sciences*, 78, (20), 593. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8598-0>
- Egea-Corbacho, A.; Ruiz, S. G.; Alonso, J. M. Q. 2019. Removal of emerging contaminants from wastewater using nanofiltration for its subsequent reuse: Full-scale pilot plant. *Journal of cleaner production*, 214, 514-523. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.297>
- Ek, M.; Baresel, C.; Magnér, J.; Bergström, R.; Harding, M. 2014. Activated carbon for the removal of pharmaceutical residues from treated wastewater. *Water Science and Technology*, 69, (11), 2372-2380. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.172>
- Fang, H.; Zhang, H.; Han, L.; Mei, J.; Ge, Q.; Long, Z.; Yu, Y. 2018. Exploring bacterial communities and biodegradation genes in activated sludge from pesticide wastewater treatment plants via metagenomic analysis. *Environmental Pollution*, 243, 1206-1216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.080>
- Ferrando-Climent, L.; Gonzalez-Olmos, R.; Anfruns, A.; Aymerich, I.; Corominas, L.; Barceló, D.; Rodriguez-Mozaz, S. 2017. Elimination study of the chemotherapy drug tamoxifen by different advanced oxidation processes: Transformation products and toxicity assessment. *Chemosphere*, 168, 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.057>
- Fijalkowski, K. 2019. Emerging contaminants in sludge (endocrine disruptors, pesticides, and pharmaceutical residues, including illicit drugs/controlled substances, etc.). In: Prasad, M. N. V.; de Campos Favas, P. J.; Vithanage, M.; Mohan, S. V. [eds.]. *Industrial and Municipal Sludge: Emerging Concerns and Scope for Resource Recovery*, 1 ed., pp. 455-473.

- Fischer, K.; Grimm, M.; Meyers, J.; Dietrich, C.; Gläser, R.; Schulze, A. 2015. Photoactive microfiltration membranes via directed synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the polymer surface for removal of drugs from water. *Journal of Membrane Science*, 478, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.01.009>
- Fonseca, C. G. M. 2019. Remoção de micropoluentes de interesse emergente em matriz aquosa por adsorção em carvão ativado em pó e superfino. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, Brasil. 148p.
- Freitas, D. A.; Cabral, J. J. S. P.; Rocha, F. J. S.; Paiva, A. L. R.; Sens, M. L.; Veras, T. B. 2017. *Cryptosporidium* spp. and *Giardia* spp. removal by bank filtration at Beberibe River, Brazil. *River Research and Applications*, 33, (7), 1079-1087. <https://doi.org/10.1002/rra.3151>
- Fujioka, T.; Kodamatani, H.; Yujue, W.; Yu, K. D.; Wanjaya, E. R.; Yuan, H.; Fang, M.; Snyder, S. A. 2020. Assessing the passage of small pesticides through reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 595, 117577. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117577>
- Gaffney, V. J.; Cardoso, V. V.; Rodrigues, A.; Ferreira, E.; Benoliel, M. J.; Almeida, C. M. 2014. Análise de fármacos em águas por SPE-UPLC-ESI-MS/MS. *Química Nova*, 37, (1), 138-149. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422014000100023>
- Glassmeyer, S. T.; Furlong, E. T.; Kolpin, D. W.; Batt, A. L.; Benson, R.; Boone, J. S.; Conerly, O.; Donohue, M. J.; King, N. D.; Kostich, M. S.; Mash, H. E.; Pfaller, S. L.; Schenck, K. M.; Simmons, J. E.; Varughese, E. A.; Vesper, S. J.; Villegas, N. E.; Wison, V. S. 2017. Nationwide reconnaissance of contaminants of emerging concern in source and treated drinking waters of the United States. *Science of the Total Environment*, 581, 909-922. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.004>
- Gogoi, A.; Mazumder, P.; Tyagi, V. K.; Chaminda, G. G. T.; Na, A. K.; Kumar, M. 2018. Occurrence and fate of emerging contaminants in water environment: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.009>
- Gomes, J.; Costa, R.; Quinta-Ferreira, R. M.; Martins, R. C. 2017. Application of ozonation for pharmaceuticals and personal care products removal from water. *Science of the Total Environment*, 586, 265-283. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.216>
- Griffero, L.; Alcántara-Durán, J.; Alonso, C.; Rodríguez-Gallego, L.; Moreno-González, D.; García-Reyes, J. F.; Molina-Díaz, A.; Pérez-Parada, A. 2019. Basin-scale monitoring and risk assessment of emerging contaminants in South American Atlantic coastal lagoons. *Science of the Total Environment*, 697, 134058. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134058>
- He, K.; Asada, Y.; Echigo, S.; Itoh, S. 2018. Biodegradation of pharmaceuticals and personal care products in the sequential combination of activated sludge treatment and soil aquifer treatment. *Environmental Technology*, 41, (3), 378-388. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1499810>
- Hijosa-Valsero, M.; Matamoros, V.; Sidrach-Cardona, R.; Martín-Villacorta, J.; Bécares, E.; Bayona, J. M. 2010. Comprehensive assessment of the design configuration of constructed wetlands for the removal of pharmaceuticals and personal care products from urban wastewaters. *Water Research*, 44, (12), 3669-3678. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.022>
- Hubetska, T.; Kobylinska, N.; García, J. R. 2020. Efficient adsorption of pharmaceutical drugs from aqueous solution using a mesoporous activated carbon. *Adsorption*, 26, (2), 251-266. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00143-0>
- Ignatowicz, K.; Puchlik, M.; Ozowicki, J. 2020. Removal of pesticides from wastewater by the use of constructed wetlands. *Journal of Ecological Engineering*, 21, (1), 219-223.
- Ilyas, H.; Van Hullebusch, E. D. 2020. Performance comparison of different constructed wetlands designs for the removal of personal care products. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, (9), 3091. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093091>
- Jaramillo, M.; Grischek, T.; Boernick, H.; Velez, J. I. 2019. Evaluation of riverbank filtration in the removal of pesticides: an approximation using column experiments and contaminant transport modeling. *Clean Technologies and*

- Environmental Policy, 21, (1), 179-199. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1627-y>
- Jin, Z.; Pan, Z.; Yu, S.; Lin, C. 2010. Experimental study on pressurized activated sludge process for high concentration pesticide wastewater. Journal of Environmental Sciences, 22, (9), 1342-1347. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60260-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60260-6)
- Kapelewska, J.; Kotowska, U.; Karpińska, J.; Kowalczyk, D.; Arciszewska, A.; Świryo, A. 2018. Occurrence, removal, mass loading and environmental risk assessment of emerging organic contaminants in leachates, groundwaters and wastewaters. Microchemical Journal, 137, 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.11.008>
- Kårelid, V.; Larsson, G.; Björleinius, B. 2017. Pilot-scale removal of pharmaceuticals in municipal wastewater: Comparison of granular and powdered activated carbon treatment at three wastewater treatment plants. Journal of Environmental Management, 193, 491-502. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.042>
- Karimi, H.; Rahimpour, A.; Kebria, M. R. S. 2016. Pesticides removal from water using modified piperazine-based nanofiltration (NF) membranes. Desalination And Water Treatment, 57, (52), 24844-24854. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2016.1156580>
- Katsigiannis, A.; Noutsopoulos, C.; Mantziaras, J.; Gioldasi, M. 2015. Removal of emerging pollutants through granular activated carbon. Chemical Engineering Journal, 280, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.109>
- Kozak, C.; Schirmer, W. N.; Gomes, S.; Fonseca, A. F. 2014. Verifying the efficacy in removing nutrients using wastewater treatment stations by constructed wetlands. Recursos Hídricos, 35, (1), 69-76. <https://doi.org/10.5894/rh35n1-5>
- Kruć, R.; Dragon, K.; Górski, J. 2019. Migration of Pharmaceuticals from the Warta River to the Aquifer at a Riverbank Filtration Site in Krajkowo (Poland). Water, 11, (11), 2238-2249. <https://doi.org/10.3390/w11112238>
- Krzeminski, P.; Schwermer, C.; Wennberg, A.; Langford, K.; Vogelsang, C. 2017. Occurrence of UV filters, fragrances and organophosphate flame retardants in municipal WWTP effluents and their removal during membrane post-treatment. Journal of Hazardous Materials, 323, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.001>
- Kümmerer, K. 2010. Pharmaceuticals in the environment. Annual Review of Environment and Resources, 35, (1), 57-75. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-052809-161223>
- Lapworth, D. J.; Baran, N.; Stuart, M. E.; Ward, R. S. 2012. Emerging organic contaminants in groundwater: a review of sources, fate and occurrence. Environmental pollution, 163, 287-303. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034>
- Ledakowicz, S.; Drozdek, E.; Boruta, T.; Foszpańczyk, M.; Olak-Kucharczyk, M.; Śyła, R.; Gmurek, M. 2019. Impact of Hydrogen Peroxide on the UVC Photolysis of Diclofenac and Toxicity of the Phototransformation Products. International Journal of Photoenergy, 2019, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/1086704>
- Lee, S. H.; Kim, K. H.; Lee, M.; Lee, B. D. 2019. Detection status and removal characteristics of pharmaceuticals in wastewater treatment effluent. Journal of Water Process Engineering, 31, 100828-100834. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100828>
- Lofrano, G.; Libralato, G.; Meric, S.; Vaiano, V.; Sacco, O.; Venditto, V.; Guida, M.; Carotenuto, M. 2020. Occurrence and potential risks of emerging contaminants in water. In: Sacco, O.; Vaiano, V. [eds.]. Visible Light Active Structured Photocatalysts for the Removal of Emerging Contaminants: Science and Engineering, 1 ed., 1, pp. 1-25. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-818334-2.00001-8>
- Luque-Espinar, J. A.; Navas, N.; Chica-Olmo, M.; Cantarero-Malagón, S.; Chica-Rivas, L. 2015. Seasonal occurrence and distribution of a group of ECs in the water resources of Granada city metropolitan areas (South of Spain): pollution of raw drinking water. Journal of Hydrology, 531, 612-625. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.066>
- Lyu, T.; Zhang, L.; Xu, X.; Arias, C. A.; Brix, H.; Carvalho, P. N. 2018. Removal of the pesticide tebuconazole in constructed wetlands: Design comparison, influencing factors and modelling. Environmental Pollution, 233, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.040>
- Mahabali, S.; Spanoghe, P. 2014. Mitigation of two insecticides by wetland plants: feasibility study for the treatment of agricultural runoff in Suriname (South America). Water, Air, & Soil Pollution, 225, (1), 1771. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1771-2>



- Marien, C. B. D.; Pvert, M. L.; Azaïs, A.; M'Bra, I. C.; Drogui, P.; Dirany, A.; Robert, D. 2019. Kinetics and mechanism of Paraquat's degradation: UV-C photolysis vs UV-C photocatalysis with TiO<sub>2</sub>/SiC foams. *Journal of Hazardous Materials*, 370, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.009>
- Melo, S. A. S.; Trovó, A. G.; Bautitz, I. R.; Nogueira, R. F. P. 2009. Degradação de fármacos residuais por processos oxidativos avançados. *Química Nova*, 32, (1), 188-197. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000100034>
- Min, X.; Li, W.; Wei, Z.; Spinney, R.; Dionysiou, D. D.; Seo, Y.; Tang, C-J.; Xiao, R. 2018. Sorption and biodegradation of pharmaceuticals in aerobic activated sludge system: A combined experimental and theoretical mechanistic study. *Chemical Engineering Journal*, 342, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.012>
- Mondal, B.; Adak, A.; Datta, P. 2019. Degradation of anionic surfactant in municipal wastewater by UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Process optimization using response surface methodology. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 375, 237-243. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.02.030>
- Montagner, C. C.; Vidal, C.; Acayaba, R. D. 2017. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas no Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Química Nova*, 40, (9), 1094-1110. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170091>
- Monteoliva-García, A.; Martín-Pascual, J.; Muñío, M. M.; Poyatos, J. M. 2019. Removal of carbamazepine, ciprofloxacin and ibuprofen in real urban wastewater by using light-driven advanced oxidation processes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, (10), 6005-6018. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02365-9>
- Moreira, A. J.; Maldini, C. P.; Freschi, G. P. G. 2019. Aplicação de processo fotocatalítico mediado por dióxido de titânio para degradação de Sertralina. *Acta Brasiliensis*, 3, (1), 17-20. <https://doi.org/10.22571/2526-4338117>
- Moreira, J. C. 2013. Contaminantes Emergentes. *Revista de Química Industrial*, 1, (738), 4-13.
- Muter, O.; Ingus, P.; Selga, T.; Berzins, A.; Gudra, D.; Radovica-Spalvina, I.; Fridsmanis, D.; Bartkevics, V. 2017. Removal of pharmaceuticals from municipal wastewaters at laboratory scale by treatment with activated sludge and biostimulation. *Science of the Total Environment*, 584, 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.023>
- Nagy-Kovács, Z.; László, B.; Fleit, E.; Czichat-Mártonné, K.; Till, G.; Börnick, H.; Adomat, Y.; Grischek, T. 2018. Behavior of organic micropollutants during river bank filtration in Budapest, Hungary. *Water*, 10, (12), 1861. <https://doi.org/10.3390/w10121861>
- Naidu, R.; Espana, V. A. A.; Liu, Y.; Jit, J. 2016. Emerging contaminants in the environment: risk-based analysis for better management. *Chemosphere*, 154, 350-357. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.068>
- Nassar, R.; Trivella, A.; Mokh, S.; Al-Iskandarani, M.; Budzinski, H.; Mazellier, P. 2017. Photodegradation of sulfamethazine, sulfamethoxypyridazine, amitriptyline, and clomipramine drugs in aqueous media. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 336, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2016.12.008>
- Nawaz, T.; Sengupta, S. 2019. Contaminants of Emerging Concern: Occurrence, Fate, and Remediation. *Advances in Water Purification Techniques*, 67-114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814790-0.00004-1>
- Nivala, J.; Kahl, S.; Boog, J.; van Afferden, M.; Reemtsma, T.; Müller, R. A. 2019. Dynamics of emerging organic contaminant removal in conventional and intensified subsurface flow treatment wetlands. *Science of the Total Environment*, 649, 1144-1156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.339>
- Oberg, G.; Leopold, A. 2019. On the role of review papers in the face of escalating publication rates-a case study of research on contaminants of emerging concern (CECs). *Environment International*, 131, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104960>
- Oberleitner, D.; Schulz, W.; Bergmann, A.; Achten, C. 2020. Impact of seasonality, redox conditions, travel distances and initial concentrations on micropollutant removal during riverbank filtration at four sites. *Chemosphere*, 250, 126255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126255>
- Oliveira, D. M.; Cavalcante, R. P.; Silva, L. M.; Sans, C.; Esplugas, S.; Oliveira, S. C.; Machuelek Junior, A. 2018. Identification of intermediates, acute toxicity removal, and

- kinetics investigation to the Ametryn treatment by direct photolysis (UV254), UV254/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Fenton, and photo-Fenton processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 4348-4366. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1342-6>
- Pacheco, I. S.; Amaral, F. A.; Canobre, S. C. 2019. Utilização de hidróxidos duplos lamelares para a remoção do contaminante emergente diclofenaco. *Brazilian Journal of Development*, 5, (4), 3796-3802.
- Park, J.; Yamashita, N.; Tanaka, H. 2018. Membrane fouling control and enhanced removal of pharmaceuticals and personal care products by coagulation-MBR. *Chemosphere*, 197, 467-476. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.063>
- Paucar, N. E.; Kim, I.; Tanaka, H.; Sato, C. 2019. Ozone treatment process for the removal of pharmaceuticals and personal care products in wastewater. *Ozone: Science & Engineering*, 41, (1), 3-16. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1482456>
- Pérez-Lucas, G.; Aliste, M.; Vela, N.; Garrido, I.; Fenoll, J.; Navarro, S. 2020. Decline of fluoxypyr and triclopyr residues from pure, drinking and leaching water by photo-assisted peroxonation. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 358-365. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.039>
- Petrie, B.; Rood, S.; Smith, B. D.; Proctor, K.; Youdan, J.; Barden, R.; Kasprzyk-Hordern, B. 2018. Biotic phase micropollutant distribution in horizontal sub-surface flow constructed wetlands. *Science of the total environment*, 630, 648-657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.242>
- Pinho, E. A. S.; Ferreira, L. F. R.; Américo-Pinheiro, J. H. P.; Torres, N. H. 2017. Tratamento de esgoto sanitário contendo micropoluentes no Brasil: revisão. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, 7, (2), 46-63.
- Ramírez-Malule, H.; Quiñones-Murillo, D. H.; Manotas-Duque, D. 2020. Emerging contaminants as global environmental hazards. A bibliometric analysis. *Emerging Contaminants*, 6, 179-193. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2020.05.001>
- Rasheed, T.; Bilal, M.; Nabeel, F.; Adeel, M.; Iqbal, H. M. 2019. Environmentally-related contaminants of high concern: potential sources and analytical modalities for detection, quantification, and treatment. *Environment International*, 122, 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.038>
- Rathi, B. S.; Kumar, P. S. 2021. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. *Environmental Pollution*, 280, 116995. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>
- Reis, E. O.; Foureaux, A. F. S.; Rodrigues, J. S.; Moreira, V. R.; Lebron, Y. A.; Santos, L. V.; Amaral, M. C. S.; Lange, L. C. 2019. Occurrence, removal and seasonal variation of pharmaceuticals in Brazilian drinking water treatment plants. *Environmental Pollution*, 250, 773-781. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.102>
- Ríos, F.; Olak-Kucharczyk, M.; Gmurek, M.; Ledakowicz, S. 2017. Removal efficiency of anionic surfactants from water during UVC photolysis and advanced oxidation process in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UVC system. *Archives of Environmental Protection*, 43, (1), 20-26. <https://doi.org/10.1515/aep-2017-0003>
- Riva, F.; Castiglioni, S.; Fattore, E.; Manenti, A.; Davoli, E.; Zuccato, E. 2018. Monitoring emerging contaminants in the drinking water of Milan and assessment of the human risk. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221, (3), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.008>
- Rivera-Utrilla, J.; Sánchez-Polo, M.; Ferro-García, M. Á.; Prados-Joya, G.; Ocampo-Pérez, R. 2013. Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water: a review. *Chemosphere*, 93, (7), 1268-1287. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.059>
- Roberts, J.; Kumar, A.; Du, J.; Hepplewhite, C.; Ellis, D. J.; Christy, A. G.; Beavis, S. G. 2016. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Australia's largest inland sewage treatment plant, and its contribution to a major Australian river during high and low flow. *Science of the Total Environment*, 541, 1625-1637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.145>
- Rodriguez-Narvaez, O. M.; Peralta-Hernandez, J. M.; Goonetilleke, A.; Bandala, E. R. 2017. Treatment technologies for emerging contaminants in water: a review. *Chemical Engineering Journal*, 323, 361-380. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.106>
- Sato, C.; Kim, I.; Tanaka, H. 2016. Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> on UV photo-oxidation of pharmaceuticals and personal care products in wastewater.



- Journal of Environmental Engineering, 142, (11), 04016055.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001132](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001132)
- Sharma, B. M.; Bečanová, J.; Scheringer, M.; Sharma, A.; Bharat, G. K.; Whitehead, P. G.; Klánová, J.; Nizzetto, L. 2019. Health and ecological risk assessment of emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, and artificial sweeteners) in surface and groundwater (drinking water) in the Ganges River Basin, India. *Science of the Total Environment*, 646, 1459-1467.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.235>
- Soares, A. F. S.; Leão, M. M. D. 2015. Contaminação dos mananciais por micropoluentes e a precária remoção desses contaminantes nos tratamentos convencionais de água para potabilização. *De Jure: Revista Jurídica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais*, 14, (24), 36-85.
- Solís, R. R.; Gimeno, O.; Rivas, F. J.; Beltrán, F. J. 2019b. Simulated solar driven photolytic ozonation for the oxidation of aqueous recalcitrant-to-ozone tritosulfuron. Transformation products and toxicity. *Journal of Environmental Management*, 233, 513-522.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.068>
- Solís, R. R.; Medina, S.; Gimeno, O.; Beltrán, F. J. 2019a. Solar photolytic ozonation for the removal of recalcitrant herbicides in river water. *Separation and Purification Technology*, 212, 280-288.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.035>
- Sorensen, J. P. R.; Lapworth, D. J.; Nkhuwa, D. C. W.; Stuart, M. E.; Gooddy, D. C.; Bell, R. A.; Chirwa, M.; Kabika, J.; Liemisa, M.; Chibesa, M.; Pedley, S. 2015. Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa. *Water Research*, 72, 51-63.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.002>
- Suarez, S.; Lema, J. M.; Omil, F. 2010. Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) under nitrifying and denitrifying conditions. *Water Research*, 44, (10), 3214-3224.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.040>
- Sun, Q.; Li, M.; Ma, C.; Chen, X.; Xie, X.; Yu, C. P. 2016. Seasonal and spatial variations of PPCP occurrence, removal and mass loading in three wastewater treatment plants located in different urbanization areas in Xiamen, China. *Environmental Pollution*, 208, 371-381.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.10.003>
- Suo, F.; Liu, X.; Li, C.; Yuan, M.; Zhang, B.; Wang, J.; Ji, M. 2019. Mesoporous activated carbon from starch for superior rapid pesticides removal. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 806-813.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.132>
- Szabová, P.; Hencelová, K.; Sameliaková, Z.; Marcová, T.; Staňová, A. V.; Grabicová, K.; Bodík, I. 2020. Ozonation: effective way for removal of pharmaceuticals from wastewater. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 151, 685-691.  
<https://doi.org/10.1007/s00706-020-02600-x>
- Taheran, M.; Brar, S. K.; Verma, M.; Surampalli, R. Y.; Zhang, T. C.; Valéro, J. R. 2016. Membrane processes for removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) from water and wastewaters. *Science of the Total Environment*, 547, 60-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.139>
- Tazdaït, D.; Salah, R.; Grib, H.; Abdi, N.; Mameri, N. 2018. Kinetic study on biodegradation of glyphosate with unacclimated activated sludge. *International Journal of Environmental Health Research*, 28, (4), 448-459.  
<https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1487043>
- Tran, N. H.; Reinhard, M.; Gin, K. Y. H. 2018. Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions-a review. *Water Research*, 133, 182-207.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.029>
- Tröger, R.; Köhler, S. J.; Franke, V.; Bergstedt, O.; Wiberg, K. 2020. A case study of organic micropollutants in a major Swedish water source—Removal efficiency in seven drinking water treatment plants and influence of operational age of granulated active carbon filters. *Science of the Total Environment*, 706, 135680.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135680>
- Valhondo, C.; Carrera, J.; Martínez-Landa, L.; Wang, J.; Amalfitano, S.; Levantesi, C.; Diaz-Cruz, M. S. 2020. Reactive Barriers for Renaturalization of Reclaimed Water during Soil Aquifer Treatment. *Water*, 12, (4), 1012.  
<https://doi.org/10.3390/w12041012>
- Van Driezum, I. H.; Derx, J.; Oudega, T. J.; Zessner, M.; Naus, F. L.; Saracevic, E.

- Blaschke, A. P. 2019. Spatiotemporal resolved sampling for the interpretation of micropollutant removal during riverbank filtration. *Science of the Total Environment*, 649, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.300>
- Viegas, R. M. C.; Mesquita, E.; Martins, A.; Rosa, M. J. 2020. Estratégias de reforço físico-químico com carvão ativado em pó para controle de fármacos em ETAR. *Águas e Resíduos*. 4, (6), 18-27. <https://doi.org/10.22181/aer.2020.0602>
- Von Sperling, M.; Sezerino, P. H. 2018. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. *Wetlands*, 2359-0548.
- Wang, S.; Wang, J. 2017. Degradation of emerging contaminants by acclimated activated sludge. *Environmental Technology*, 39, (15), 1985-1993. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1345989>
- Wilkinson, J.; Hooda, P. S.; Barker, J.; Barton, S.; Swinden, J. 2017. Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water: An overarching review of the field. *Environmental Pollution*, 231, 954-970. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.032>
- Williams, M.; Kookana, R. S.; Mehta, A.; Yadav, S. K.; Tailor, B. L.; Maheshwari, B. 2019. Emerging contaminants in a river receiving untreated wastewater from an Indian urban centre. *Science of the Total Environment*, 647, 1256-1265. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.084>
- Yadav, M. K.; Short, M. D.; Gerber, C.; van den Akker, B.; Aryal, R.; Saint, C. P. 2019. Occurrence, removal and environmental risk of markers of five drugs of abuse in urban wastewater systems in South Australia. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, (33), 33816-33826. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2464-6>
- Yang, L.; He, J. T.; Su, S. H.; Cui, Y. F.; Huang, D. L.; Wang, G. C. 2017. Occurrence, distribution, and attenuation of pharmaceuticals and personal care products in the riverside groundwater of the Beiyun River of Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, (18), 15838-15851. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8999-0>
- Yang, X.; Flowers, R. C.; Weinberg, H. S.; Singer, P. C. 2011. Occurrence and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in an advanced wastewater reclamation plant. *Water Research*, 45, (16), 5218-5228. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.07.026>
- Zhang, L.; Lyu, T.; Vargas, C. A. R.; Arias, C. A.; Carvalho, P. N.; Brix, H. 2018. New insights into the effects of support matrix on the removal of organic micro-pollutants and the microbial community in constructed wetlands. *Environmental Pollution*, 240, 699-708. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.028>