

Zijlstra, F. J. (2003) Anti-inflammatory actions of acupuncture. *Mediators Inflamm.* 12(2), 59–69. doi: 10.1080/0962935031000114943

CONTAMINANTES EMERGENTES: UM RISCO À SAÚDE

DOI: 10.56041/9786599841835-3

**VIANCELLI, Aline**

Universidade do Contestado, Concórdia, SC, Brasil

<https://orcid.org/0000-0003-1654-6510>

**MICHELON, William\***

Universidade do Contestado, Concórdia, SC, Brasil

<https://orcid.org/0000-0003-0713-0150>

\* Autor correspondente: [william@unc.br](mailto:william@unc.br)

## RESUMO

Contaminantes emergentes são representados por um grupo de substâncias naturais e sintéticas, como hormônios, produtos farmacêuticos (reguladores lipídicos, diuréticos, anti-inflamatórios não esteroides, estimulantes, antissépticos, analgésicos, beta bloqueadores), detergentes, desinfetantes, produtos de higiene pessoal e fitoestrogênio. Resíduos destes compostos estão presentes em efluentes domésticos, industriais ou agrícolas que, ao serem dispostos no ambiente, dispersam esses resíduos para o solo e água. As preocupações com esses resíduos devem-se à sua alta solubilidade e ao fato de permanecerem bioativos em matrizes ambientais, e mesmo em concentrações baixas causam alterações hormonais e metabólicas em animais e humanos. Devido à importância deste tema, a presente revisão aborda os conceitos, preocupações e alternativas de tratamento de efluentes para minimizar a chegada destes resíduos no ambiente.

**Palavras-chave:** Desreguladores endócrinos. Bisfenol A. Tratamento de efluentes.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma gama de resíduos químicos utilizados na indústria, na agricultura ou resultantes de processos metabólicos naturais de mamíferos, chegam diariamente ao ambiente. Mesmo que o uso destes compostos traga benefícios importantes nas atividades diárias da humanidade, a presença deles em ambientes aquáticos é uma preocupação global devido aos riscos à saúde e impactos ecológicos desencadeados. Essas alterações estendem-se desde alterações reprodutivas até casos de obesidade (Baillie-Hamilton, 2002; Casals-Casas et al., 2011; McAllister et al., 2009). Esses compostos foram denominados Contaminantes Emergentes.

Contaminantes emergentes são compostos químicos naturais ou artificiais que, mesmo em nano concentrações, tem potencial de causar danos a diferentes formas de vida (Hamilton et al., 2015). Embora o termo possa nos levar a errônea interpretação de que os contaminantes emergentes são poluentes que surgiram recentemente no ambiente, eles estão por aqui há muito tempo. Os primeiros relatos científicos datam

de 1965, quando Stumm-Zollinger e Fair reportaram a presença de estrogênio (um hormônio) em efluentes domésticos (Montagner et al., 2017). Mas por que então o termo “emergentes”? Isso se deve a descoberta relativamente recente (1990) dos danos causados por estes compostos.

Dentre os contaminantes emergentes está um grupo chamado desreguladores endócrinos. A criação do termo “desreguladores endócrinos” é atribuído a Theo Colborn et al. (1993) que no seu artigo apontaram uma gama de compostos capazes de alterar o sistema hormonal de animais e humanos (Colborn et al., 1993). Como consequência, essas alterações causavam problemas de desenvolvimento reprodutivos e diferenciação sexual em animais (Colborn et al., 1993). Sabe-se que a desregulação pode ocorrer por interferência na produção, secreção e metabolismo de hormônio, ou ainda pela mimetização de hormônios naturais (neste caso, os resíduos de compostos químicos sintéticos “enganam” o sistema endócrino por terem estruturas químicas semelhantes aos hormônios humanos) (Tabb et al., 2006). O uso de produtos com características de desreguladores endócrinos iniciou na década de 1940, mas vale destacar que a discussão sobre os danos causados iniciou com Theo Colborn (Theodora Emily Corlborn – viveu de 1927 a 2014). Colborn estudou diversos trabalhos e percebeu a associação entre os problemas reprodutivos em animais e humanos expostos por longos períodos a nano concentrações destes resíduos. Ela foi precursora e referência mundial na discussão deste tema desde a década de 1990 (Kabir et al., 2015).

No Brasil, os estudos nesta área iniciaram em 1995, com a detecção de pesticidas em água de rio, e nos anos seguintes a remoção de fármacos e hormônios em estações de tratamento de esgotos (Montagner et al., 2017). Atualmente vários grupos estudam processos de remoção, danos ecológicos e interação com micro-organismos (Perondi et al., 2020; Viancelli et al., 2020, 2023).

## **2. CONTAMINANTES EMERGENTES**

Os contaminantes emergentes podem ser de origem natural do metabolismo animal, humano ou de plantas (fitoestrogênio), mas a grande maioria compreende

resíduos de compostos sintéticos, como analgésicos, reguladores de apetite, psicoativos, ftalatos, alquilfenóis, organoclorados, bisfenol A, parabenos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, pesticidas, hormônios, produtos de beleza e de higiene pessoal (Daughton et al., 1999). Entre os hormônios classificados como contaminantes emergentes, destaca-se o 17 $\beta$ -estradiol (E2), um hormônio natural amplamente utilizado como repositores hormonal (Nie et al., 2015).

Esses produtos chegam ao ambiente terrestre ou aquático por meio da disposição, percolação ou escoamento superficial de efluentes não tratados, ou cujo tratamento utilizado não seja eficiente na remoção destes compostos. Essa dificuldade na remoção está associada à grande variedade de compostos, e características químicas como polaridade, solubilidade, massa molecular e carga elétrica (Garcia-Becerra et al., 2018). Os contaminantes emergentes têm sido encontrados no mundo todo, em amostras de água superficial, água subterrânea, ambiente marinho, sedimento e no solo (Bayen et al., 2013; Cabeza et al., 2012; Kong et al., 2015; Padhye et al., 2014).

À medida que mais e mais desses compostos forem usados, as suas concentrações ambientais aumentarão, e por essa razão os estudos nesta área tendem a aumentar, uma vez que os dados à saúde causados por estes compostos não podem ser ignorados (Yang et al., 2019). Um agravante quanto a toxicidade destes compostos estão associadas aos compostos de transformação gerados pela quebra/degradação dos contaminantes emergentes.

Ao chegarem ao ambiente, os contaminantes emergentes ficam expostos a intempéries como radiação UV (fotólise), interação com outros compostos (oxidação), ação de micro-organismos (biodegradação) e hidrólise. Esses processos podem desencadear a quebra das moléculas, transformando-as em outros compostos (chamados compostos de transformação). A preocupação em relação a esses compostos está no fato de que alguns deles são mais tóxicos do que o composto do qual se originaram (Escher et al., 2011). A identificação de compostos de transformação e a determinação das rotas de transformação são lacunas importantes a serem preenchidas neste campo de estudo (Richardson et al., 2018).

É importante destacar que a quebra dos compostos e os produtos originados, dependerá do ambiente (natural ou durante um processo de tratamento), pois as interações podem ser diferentes (Noguera-Oviedo et al., 2016).

### 3. DANOS À SAÚDE HUMANA E ANIMAL

Os danos à saúde relacionados a contaminantes emergentes demoraram a ser percebidos devido à dificuldade em associar/documentar causa e efeito. Um exemplo bem conhecido foi o medicamento dietilestilbestrol (DES) que durante 30 anos foi prescrito para aliviar enjoos relacionados à gestação. Ocorre que as bebes mulheres gestadas e expostas a este medicamento apresentavam problemas reprodutivos quando chegavam a vida adulta (Colborn et al., 1993). Assim que as associações foram descobertas, o medicamento parou de ser prescrito.

Outro grande exemplo da relação entre contaminantes emergentes do tipo desregulador endócrino e saúde, é o Bisfenol A (BPA). Esse produto é amplamente utilizado para a fabricação de recipientes de plástico, embalagens para alimentos, PVC, e recibos térmicos (Rochester, 2013), aos quais estamos expostos diariamente. Em estudos laboratoriais observou-se que o BPA se liga aos receptores de estrogênio e tem efeitos estrogênicos. Embora o BPA tenha uma afinidade menor para os receptores de estrogênio em relação ao 17- $\beta$  estradiol (E2), a sua potência estrogênica é igual ao E2 para respostas mediadas por receptores não nucleares de estrogênio (García-Enguídanos et al., 2002). Estudos com camundongos expostos antes do nascimento ao BPA mostraram efeitos na vida adulta dos animais como puberdade acelerada, aumento de peso corporal, alteração nas glândulas mamárias, e várias alterações do sistema reprodutivo (Somm et al., 2009). O BPA também interage com órgãos e sistemas fisiológicos, incluindo o sistema nervoso central em desenvolvimento, o pâncreas e o sistema imunológico (Wetherill et al., 2007). A presença de BPA na urina de adultos e crianças é detectável em 99% da população (Braun et al., 2011; Calafat et al., 2005), assim como em sangue do cordão umbilical e tecido placentário

(Schönfelder et al., 2002), leite materno (Jin et al., 2020), líquido folicular e amniótico (Kim et al., 2021) e no fígado (Abdulhameed et al., 2022).

Mas como o BPA chega ao nosso organismo? Quando os recipientes plásticos são aquecidos, eles liberam resíduo de BPA, que por sua vez é transferido para o alimento que se está aquecendo. Um caso interessante refere-se ao uso de BPA na fabricação de mamadeiras. Ocorre que, ao aquecer a mamadeira com o leite, o BPA era liberado e contaminava o leite do bebê. A exposição a longo prazo levava a problemas hormonais percebidos somente na adolescência, com o desenvolvimento do sistema reprodutivo (puberdade). Por essa razão, proibiu-se o uso de BPA na fabricação de mamadeiras (Baluka et al., 2016).

Problemas de saúde associados a contaminantes emergentes estão bem documentados, como por exemplo, os estudos *in vitro*, *in vivo* e epidemiológicos mostrando a associação entre a exposição humana a estes compostos e a epidemia de obesidade, síndromes metabólicas e diabetes tipo 2 (Baillie-Hamilton, 2002; Casals-Casas et al., 2011; McAllister et al., 2009).

No caso de animais selvagens, vale ressaltar os efeitos de bioacumulação dos resíduos ao longo da cadeia alimentar. Neste sentido, a concentração do poluente nos organismos do animal aumenta, devido ao consumo de outros seres contaminados (Darbre, 2022).

Este cenário num primeiro momento é assustador. No entanto, o grande papel da ciência é buscar alternativas para resolver problemas ou mitigar esses dados. Por conta disso, ao longo dos anos as técnicas de detecção destes compostos, assim como métodos de remoção destes de efluentes e águas residuárias, vem sendo estudado.

#### **4. TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA QUANTIFICAÇÃO DE COMPOSTOS EMERGENTES**

Devido à sua estrutura química, vários dos contaminantes emergentes podem ser facilmente dissolvidos na água e transferidos através do ciclo hidrológico, representando um risco considerável para os seres aquáticos e humanos. A lista de produtos químicos reconhecidos como contaminantes emergentes aumentou dramaticamente ao longo dos anos, resultando em uma quantidade desconhecida de

compostos originais e produtos de transformação presentes em efluentes, águas superficiais e subterrâneas e água potável (Khan et al., 2022).

A identificação e quantificação dessas substâncias em água ou efluentes tornou-se uma questão científica fundamental, exigindo abordagens analíticas extremamente avançadas, capazes de detectar concentrações na magnitude de nanogramas por litro ( $\text{ng L}^{-1}$ ) (de Oliveira et al., 2020). Assim, há uma necessidade de informações aprofundadas sobre contaminantes emergentes, do ponto de vista da química analítica, o que pode fornecer conhecimento sobre monitoramento, bem como o desenvolvimento de métodos de caracterização e quantificação, que sejam rápidos e eficazes para detectar essas substâncias (Reichert et al., 2019).

Os principais métodos analíticos para identificação e quantificação são a cromatografia, gasosa ou líquida, combinada com espectrometria de massa. O uso da espectrometria de massa na detecção e quantificação de contaminantes emergentes está ligado aos avanços na seletividade, sensibilidade e especificidade do método, permitindo a identificação e quantificação precisas de poluentes específicos, mesmo em matrizes muito complexas, como água superficiais ou águas residuais (Caldas et al., 2018; Chen et al., 2018; Xu et al., 2019).

Outros métodos analíticos para medição de contaminantes emergentes foram testados, incluindo eletroforese capilar, técnicas imunanalíticas e testes microbiológicos. No entanto, a eletroforese capilar é menos sensível do que as técnicas de cromatografia líquida, enquanto as técnicas imunanalíticas são dependentes do anticorpo usado para o ensaio e são restritas na sua capacidade de detectar muitos analitos simultaneamente, e os testes microbiológicos são altamente dependentes da composição da amostra (Buchberger, 2011).

#### **4.1 Tecnologias aplicadas para remoção de contaminantes emergentes**

Os métodos não tradicionais de tratamento de águas, incluindo as residuárias, evoluíram ao longo do tempo à medida que novas abordagens foram criadas. Estes processos de tratamentos são classificados em três tipos: tecnologia de mudança de fase e retenção, processos oxidativos avançados e tratamento biológico.



#### 4.1.1 Tecnologia de mudança de fase e retenção

A adsorção por carvão ativado é uma das tecnologias mais utilizadas, devido a sua alta porosidade e área superficial específica (Rivera-Utrilla et al., 2013). O carvão ativado é um recurso de tratamento altamente adsorvente e eficaz para muitos contaminantes emergentes. O carvão ativado pode remover até 90% dos contaminantes emergentes, como naproxeno e diclofenaco (de Oliveira et al., 2020; Grover et al., 2011; Sotelo et al., 2012). No entanto, outros contaminantes reportados na literatura, apresentaram taxas de remoção > 90%, somente após um longo período (Huang et al., 2014; Ruiz et al., 2010).

A fonte da matéria-prima do carvão ativado é uma consideração importante, pois dependendo das suas características, influencia significativamente nas taxas de remoção dos contaminantes. Um exemplo foi reportado na remoção do acetaminofeno, onde o carvão ativado derivado de madeira removeu mais de 90%, enquanto outras fontes de carvão ativado atingiram eficiência de remoção de 60-87% (Cabrita et al., 2010). Similarmente, empregando carvão ativado preparado a partir de subproduto agrícola (bagaço de azeitona), a eliminação do diclofenaco foi de 90,4% (Baccar et al., 2012). A tetraciclina foi removida da água usando carvão ativado derivado de quatro fontes distintas: polpa de beterraba, casca de amendoim, casca de coco e carvão de madeira ativado quimicamente com ácido fosfórico. Os dois primeiros proporcionaram alta eliminação de tetraciclina (>90%), mas o carvão ativado derivado de madeira gerou 75% de remoção e a casca de coco removeu apenas 30% (Torres-Pérez et al., 2012).

Sistemas de tratamentos baseados em adsorção podem ser integrados com outros processos de tratamento. Por exemplo, uma combinação de três tratamentos distintos: carvão ativado, ultrafiltração e coagulação, tem sido recomendada para remoção de contaminantes emergentes (Acero et al., 2012). Adicionalmente, o tipo de substância retida por processos de membrana é determinado pelo tamanho dos poros, carga superficial e hidrofobicidade. Após o processo de ultrafiltração foi alcançada uma remoção de 93, 68, 98, 97, 89, 64 e 98 % para cafeína, diclofenaco,

triclosan, bisfenol A, naproxeno, sulfametazol e cetoprofeno, respectivamente (de Oliveira et al., 2020).

Melo-Guimarães et al. (2013) alcançaram 15% e 78% de remoção para dois derivados de ácido ftalato diferentes (Bis-2-etil-hexilftalato e butilbenzilftalato) por processo de ultrafiltração. Em geral, a ultrafiltração é mais eficaz na remoção de contaminantes emergentes polares e altamente solúveis em água do que compostos apolares e pouco solúveis em água. Por exemplo, derivados de hormônios e contaminantes emergentes semelhantes a ácidos orgânicos, (estrona, 17 $\alpha$ -etinilestradiol, 17 $\beta$ -estradiol, diclofenaco e cetoprofeno), demonstraram ter maior eficiência de remoção, enquanto ésteres de ftalato menos polares, apresentaram baixas taxas de remoção (Melo-Guimarães et al., 2013; Sutzkover-Gutman et al., 2010; Zhang et al., 2011).

Os processos de mudança de fase podem ser úteis para a remoção de alguns contaminantes emergentes. No entanto, a disposição final destes contaminantes é uma dificuldade considerável, pois os tratamentos geram duas correntes de efluentes, uma diluída e outra concentrada. No caso dos processos de adsorção, as impurezas são removidas para a fase sólida, enquanto nos processos de membrana, os contaminantes são removidos para a fase líquida. Assim, uma preocupação fundamental com a utilização de tecnologias de mudança de fase é que os contaminantes emergentes apenas mudam de local, mas continuam a ser um problema para o meio ambiente. Várias tecnologias estão sendo pesquisadas para dar uma alternativa sustentável ao uso de processos de tratamento padrão, como por exemplo, a combinação de filtração por membrana com oxidação química (Acero et al., 2015).

#### **4.1.2 Processos oxidativos avançados**

O interesse pelos processos oxidativos avançados (POAs) tem crescido nos últimos anos, devido à sua maior capacidade de remoção de contaminantes quando comparado aos tratamentos convencionais de tratamento de água, incluindo residuárias. As altas taxas de remoção têm sido associadas à formação de radicais livres, uma das principais características dos POAs (Shahid et al., 2021). O tipo de

reação e as circunstâncias experimentais são extremamente importantes para a formação de radicais, podendo ser produzidos por diferentes agentes e materiais, como radiação UV (Acero et al., 2018), peróxido de hidrogênio (Liu et al., 2021), ozônio (Xiang et al., 2021), dióxido de titânio (Krakowiak et al., 2021) e oxidação sonoquímica (Villegas-Guzman et al., 2015).

O processo de fotólise direta (UV) foi comparado ao processo  $H_2O_2:UV$ , no processo de degradação do ácido tolfenâmico, um anti-inflamatório comum usado na medicina humana e veterinária. Após 90 minutos, a degradação do ácido tolfenâmico ( $25 \text{ mg L}^{-1}$ ) foi de 100% utilizando  $H_2O_2:UV$  e 98,87% utilizando fotólise direta (UV) (de Melo et al., 2016). O processo de oxidação avançado usando ozônio para remoção de quatro contaminantes emergentes na água (dois esteroides: estradiol (E2) e etinilestradiol (EE2) e dois fármacos: naproxeno e ibuprofeno) foi investigado por Vallejo-Rodríguez et al. (2014). Como resultado, após o POAs, a eficiência de remoção foi de >99, 80, 80 e 90 % para estradiol, etinilestradiol, naproxeno e ibuprofeno, respectivamente.

Uma pesquisa abrangente foi realizada para investigar a eficácia relativa de vários métodos avançados de oxidação, como  $O_3$ ,  $H_2O_2$ , UV e combinações de  $UV/O_3$ ,  $UV/H_2O_2$  para a remoção de estrona (E1) de água e efluentes secundários. Apesar do fato de que a remoção de E1 foi alta para todos os POAs ( $\approx 99 \%$ ), os intermediários gerados foram mais difíceis de degradar, resultando na remoção de carbono orgânico total mais lenta. Considerando as despesas de capital e operacionais, os cálculos de energia e a análise de custos revelaram que, embora os procedimentos UV tenham baixo custo de energia, a ozonização é a alternativa mais barata (R\$ 0,00136 por litro) (Sarkar et al., 2014).

Três anti-inflamatórios não esteróides (cetoprofeno, naproxeno e piroxicam), presentes em águas, foram expostos a vários regimes de tratamento com processo oxidativo avançado usando ozônio ou  $H_2O_2/O_3$ . A remoção máxima dos anti-inflamatórios foi 96, 98 e 98 % para cetoprofeno, naproxeno e piroxicam, respectivamente. No entanto, a análise das vias de degradação das três moléculas dos anti-inflamatórios, na presença de ozônio e  $H_2O_2$  resultou na formação de um número significativo de intermediários (potencialmente mais perigosos do que as moléculas

originais). Para isso, os autores propuseram processo de ozonização seguido de polimento com carvão ativado. Assim, a filtração por carvão ativado pode mitigar os efeitos tóxicos de micropoluentes individuais e os seus subprodutos da oxidação em efluentes após POAs (Feng et al., 2015).

A doxiciclina é uma tetraciclina de amplo espectro encontrada em efluentes domésticos, industriais e agrícolas, tendo como principal desvantagem a formação de bactérias resistentes. Esse antibiótico pode ser destruído pelo processo Fenton Oxidativo ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ ). Desta maneira, Borghi et al. (2015), estudaram a degradação da doxiciclina pelo processo Fenton Oxidativo. Como resultado, as melhores condições operacionais foram as concentrações de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e  $\text{Fe}^{2+}$  de 611 e 25  $\text{mg L}^{-1}$ , respectivamente, e temperatura de 35,0°C, mas a análise de variância revelou que apenas a primeira variável apresentou efeito estatisticamente significativo sobre a remoção da doxiciclina (Borghi et al., 2015).

Diferentes tecnologias avançadas, fotocatalise heterogênea solar com  $\text{TiO}_2$ , foto-Fenton solar e ozonização, foram investigadas como tratamentos terciários para a remoção de contaminantes emergentes presentes em efluentes de estações de tratamento de águas residuais municipais. Após caracterização, 15 contaminantes emergentes foram identificados, tais como: bisfenol-A, ibuprofeno, hidroclorotiazida, diuron, atenolol, 4-AAA, diclofenaco, ofloxacina, trimetoprim, gemfibrozil, 4-MAA, naproxeno, 4-FAA, cafeína, e paraxantina. Nas circunstâncias experimentais estudadas, a ordem de eficiência de remoção dos contaminantes emergentes foi foto-Fenton solar > ozonização > fotocatalise heterogênea solar com  $\text{TiO}_2$ . Ainda, os testes de toxicidade com *Vibrio fischeri* e ensaios respirométricos não revelaram diferenças significativas na toxicidade do efluente após a aplicação dos três tratamentos terciários (Prieto-Rodríguez et al., 2013).

#### 4.1.3 Tratamento biológico

As estações convencionais de tratamento de efluentes são a tecnologia típica para remover uma ampla gama de contaminantes das águas residuais, incluindo partículas coloidais e suspensas, orgânicos dissolvidos, nutrientes e patógenos; no entanto, elas não se destinam especificamente à remoção eficaz de contaminantes

emergentes (Tran et al., 2018). A eficiência de remoção de contaminantes emergentes varia substancialmente dependendo da persistência dos compostos, propriedades físico-químicas, métodos de tratamento usados e condições operacionais/ambientais.

As estações de tratamento de efluentes normalmente usam uma fase de tratamento primário, secundário e, ocasionalmente, terciário (Rout et al., 2016). O tratamento primário, é projetado para remover partículas suspensas e coloidais, os contaminantes emergentes podem ser removidos até determinada condição, principalmente por sorção do lodo primário (Luo et al., 2014). A fase de tratamento secundário é projetada para remover orgânicos ou nutrientes por decomposição biológica. Neste sentido, contaminantes emergentes são suscetíveis a uma variedade de processos, incluindo biodegradação, sorção, dispersão, diluição, fotodegradação e volatilização, embora os mecanismos primários de remoção de contaminantes emergentes sejam biotransformação ou biodegradação e sorção (Luo et al., 2014). A fase de tratamento terciário objetiva a remoção de nutrientes, partículas suspensas e patógenos. Estudos demonstraram que nesta etapa pode haver uma considerável eficiência de remoção de contaminantes emergentes, particularmente para contaminantes emergentes resistentes (Ahmed et al., 2017; Tiwari et al., 2017).

Os contaminantes emergentes são adsorvidos no lodo primário, pois a dispersão de um componente em uma camada orgânica (lipofílica) é a via mais comum de sorção. Devido aos seus altos coeficientes de partição entre as fases sólida e líquida, as fragrâncias (galaxolide e tonalide) foram removidas em até 40%, após o tratamento primário (câmara de areia seguida de tanque de sedimentação) (Carballa et al., 2004). Tanque de sedimentação, parte constituinte do tratamento primário, conseguiu remover contaminantes emergentes com eficiências de remoção variando de 13% (monoetoxilato de nonilfenol) a 43% (Bisfenol A) (Stasinakis et al., 2013). A eficácia de remoção de contaminantes emergentes no tratamento primário variou até 28% (diclofenaco e estriol), sugerindo que a adsorção dos produtos químicos às partículas de lodo, foi substância-específica (Behera et al., 2011). Por exemplo, ibuprofeno, naproxeno, sulfametoxazol e estrona não apresentaram diminuição significativa (Carballa et al., 2004).

Durante o tratamento secundário, os contaminantes emergentes são biologicamente destruídos em graus variáveis, resultando em mineralização ou degradação parcial (produção de subprodutos). Por exemplo, a biodegradabilidade de produtos farmacêuticos, mesmo os de mesmo grupo terapêutico, pode apresentar grande variabilidade. Salgado et al. (2012), observaram que o diclofenaco apresentou baixa biodegradação (25%), quando comparada com o ibuprofeno e o cetoprofeno (> 75%). Stasinakis et al. (2010) mostraram aumento da biodegradação do triclosan em um tempo de retenção de lodo de 20 dias em comparação com 3 e 10 dias. Da mesma forma, com tempo de retenção hidráulica mais curtos, o antibiótico fluoxetina apresentou menor eficiência de biodegradação (Fernandez-Fontaina et al., 2012).

Biodegradação significativa (> 75%) foi reportada para hormônios esteróides (estrone e estradiol) (Suarez et al., 2010). O bisfenol A e o triclosan também demonstraram ser biodegradáveis, com valores de até 85 e 81%, respectivamente, embora o nonilfenol foi biodegradado em menor eficiência (até 56%) utilizando lodos ativados (Samaras et al., 2013). Adicionalmente, Stasinakis et al. (2009) observaram que aproximadamente de 60% do diuron foi biodegradado durante o processo de lodos ativados (Stasinakis et al., 2009).

Quando os sistemas primário e secundário não são suficientes para remoção completa dos contaminantes, são implantados processos de tratamento terciários, tais como: *wetlands* construídos e fitorremediação (Plöhn et al., 2021; Vymazal et al., 2021). Os *wetlands* construídos são ecossistemas artificiais que dependem da atividade das plantas para remoção dos contaminantes (Kaur et al., 2020) e podem ser categorizados de acordo com diferentes parâmetros operacionais. Esses sistemas usam uma variedade de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na interface entre o sistema radicular e o efluente em tratamento, como adsorção no solo/sedimento, volatilização, absorção e degradação (Gorito et al., 2017).

A remoção de contaminantes em *wetlands* construídos deve-se ao impacto sinérgico das raízes das plantas e da sua microbiota associada. O sistema radicular da planta é um nicho que proporciona ambientes ideais para micro-organismos, os quais são especialmente atraídos pela liberação de exsudatos radiculares e podem auxiliar as plantas a lidar com situações desfavoráveis, como a poluição (Rolli et al., 2021).

No entanto, a taxa de remoção pode variar conforme a espécie da planta e as características do composto emergente a ser removido. Por exemplo, *Iris pseudacorus* alcançou eficiência de remoção de 77,6, 68,7 e 58,2% para enrofloxacin, sulfametoxazol e genes totais de resistência a antibióticos, respectivamente, enquanto *Phragmites australis* removeu os mesmos compostos e genes com eficiências de 81,1, 64,9 e 56,2% (Huang et al., 2019). Conkle et al. (2008) empregaram um sistema de tratamento de *wetlands* construídos para remover contaminantes emergentes de efluentes. A maioria das substâncias farmacologicamente ativas apresentou eficiência de remoção superior a 90%, com exceção do sotalol e da carbamazepina, que apresentaram eficiência de remoção de 82 e 51%, respectivamente. Remoção de estrona, 17 $\beta$ -estradiol e 17 $\alpha$ -etinilestradiol a partir de efluente municipal tratado em *wetlands* construídos foi de 68, 84 e 75%, respectivamente (Song et al., 2009).

As microalgas demonstraram ser úteis no tratamento de efluentes por meio de processos de biorremediação e bioabsorção. O uso de algas para a remoção de contaminantes emergentes tem vários benefícios, incluindo a utilização de materiais de baixo custo, investimento mínimo de capital, fácil operação, manutenção reduzida e ausência ou mínima formação de subprodutos de degradação (Silva et al., 2019). Assim, como no *wetlands* construídos, a taxa de remoção é em função das condições operacionais, espécie da microalga e característica do contaminante. Ao inocular várias microalgas, Tolboom et al. (2019) mostraram percentuais de remoção > 90% para metoprolol, triclosan e ácido salicílico, 50-90% para carbamazepina e tramadol e 10% para trimetoprima e ciprofloxacina.

Escapa et al. (2017a, 2017b) avaliaram a capacidade de *Chlorella vulgaris*, *Tetradismus obliquus* e *Chlorella sorokiniana* na remoção de paracetamol e ácido salicílico presente em efluentes e descobriram que *Tetradismus obliquus* eliminou ambos os poluentes melhor do que *Chlorella vulgaris*. Sendo que a *Tetradismus obliquus* removeu mais de 93% do ácido salicílico e *Chlorella vulgaris* removeu apenas 25%. Trimetoprima (de Wilt et al., 2016) e carbamazepina (Matamoros et al., 2015) foram removidos em taxas de 60% e 62%, respectivamente.

*Scenedesmus obliquus* foi eficaz na remoção de diclofenaco. Quando *Scenedesmus obliquus* foi aplicada, a concentração inicial (25 mg L<sup>-1</sup>) foi reduzida  $\approx$

99% (Carla Escapa et al., 2018). Esta cepa também foi capaz de reduzir a toxicidade, uma vez que nenhum efeito prejudicial na mortalidade do *Zebrafish* foi observado (Carla Escapa et al., 2018). Outro estudo empregou microalgas para remover acetaminofeno e validou a importante capacidade da *Chlorella sorokiniana* na redução da concentração e toxicidade deste composto (Carla Escapa et al., 2019).

A biodegradação, fotodegradação e biossorção, incluindo absorção celular e/ou bioacumulação em microalgas, estão entre os mecanismos de eliminação mais conhecidos na literatura. No entanto, folatilização, biotransformação, bioprecipitação (biomineralização) e processos de oxidação/redução estão entre os outros mecanismos e interações mencionados. De Godos et al. (2012), por exemplo, mostraram que a fotodegradação e a biossorção foram as principais interações para explicar as biodegradações no mecanismo de remoção de tetraciclina por *Chlorella vulgaris*.

## 5. PERSPECTIVAS

Embora cientistas de todo o mundo estejam engajados na busca por respostas relacionadas à nossa exposição a contaminantes emergentes, o campo do desconhecido sobre este tema ainda é enorme. O que ocorre com a microbiota do corpo humano ao ser exposta a contaminantes emergentes? Existe sinergia na exposição a diferentes compostos? E os novos compostos que chegam todos os dias ao ambiente?

Uma das formas de mitigar os danos é diminuir ou impedir a chegada destes compostos ao ambiente. O detalhe neste ponto da ciência é encontrar uma metodologia que seja eficiente e economicamente viável. Inúmeras formas de remover estes compostos já foram testadas e mostraram-se eficientes, mas infelizmente são extremamente caras para serem instaladas em escala real, tratamento o volume crescente de efluentes gerados.



Neste sentido, cabe a nós, cientistas das mais diferentes áreas, continuarmos na busca por respostas. Estudos interdisciplinares podem ser a chave para acelerar o processo e encontrar respostas promissoras.

**CONFLITOS DE INTERESSE:** Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

## REFERÊNCIAS

- Abdulhameed, A.-S. A. R., Lim, V., Bahari, H., Khoo, B. Y., Abdullah, M. N. H., Tan, J. J., & Yong, Y. K. (2022). Adverse Effects of Bisphenol A on the Liver and Its Underlying Mechanisms: Evidence from In Vivo and In Vitro Studies. *BioMed Research International*, 2022, 1–11. doi: 10.1155/2022/8227314
- Acero, J. L., Benitez, F. J., Real, F. J., & Rodriguez, E. (2015). Elimination of Selected Emerging Contaminants by the Combination of Membrane Filtration and Chemical Oxidation Processes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(5), 139. doi: 10.1007/s11270-015-2404-8
- Acero, J. L., Benítez, F. J., Real, F. J., & Rodríguez, E. (2018). Degradation of selected emerging contaminants by UV-activated persulfate: Kinetics and influence of matrix constituents. *Separation and Purification Technology*, 201, 41–50. doi: 10.1016/j.seppur.2018.02.055
- Acero, J. L., Javier Benitez, F., Real, F. J., & Teva, F. (2012). Coupling of adsorption, coagulation, and ultrafiltration processes for the removal of emerging contaminants in a secondary effluent. *Chemical Engineering Journal*, 210, 1–8. doi: 10.1016/j.cej.2012.08.043
- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S., & Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 274–298. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.04.045
- Baccar, R., Sarrà, M., Bouzid, J., Feki, M., & Blánquez, P. (2012). Removal of pharmaceutical compounds by activated carbon prepared from agricultural by-product. *Chemical Engineering Journal*, 211–212, 310–317. doi: 10.1016/j.cej.2012.09.099
- Baillie-Hamilton, P. F. (2002). Chemical Toxins: A Hypothesis to Explain the Global Obesity Epidemic. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 8(2), 185–192. doi: 10.1089/107555302317371479
- Baluka, S. A., & Rumbelha, W. K. (2016). Bisphenol A and food safety: Lessons from developed to developing countries. *Food and Chemical Toxicology*, 92, 58–63. doi: 10.1016/j.fct.2016.03.025
- Bayen, S., Zhang, H., Desai, M. M., Ooi, S. K., & Kelly, B. C. (2013). Occurrence and

distribution of pharmaceutically active and endocrine disrupting compounds in Singapore's marine environment: Influence of hydrodynamics and physical–chemical properties. *Environmental Pollution*, 182, 1–8. doi: 10.1016/j.envpol.2013.06.028

Behera, S. K., Kim, H. W., Oh, J.-E., & Park, H.-S. (2011). Occurrence and removal of antibiotics, hormones and several other pharmaceuticals in wastewater treatment plants of the largest industrial city of Korea. *Science of The Total Environment*, 409(20), 4351–4360. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.015

Borghgi, A. A., Silva, M. F., Al Arni, S., Converti, A., & Palma, M. S. A. (2015). Doxycycline Degradation by the Oxidative Fenton Process. *Journal of Chemistry*, 2015, 1–9. doi: 10.1155/2015/492030

Braun, J. M., Kalkbrenner, A. E., Calafat, A. M., Yolton, K., Ye, X., Dietrich, K. N., & Lanphear, B. P. (2011). Impact of Early-Life Bisphenol A Exposure on Behavior and Executive Function in Children. *Pediatrics*, 128(5), 873–882. doi: 10.1542/peds.2011-1335

Buchberger, W. W. (2011). Current approaches to trace analysis of pharmaceuticals and personal care products in the environment. *Journal of Chromatography A*, 1218(4), 603–618. doi: 10.1016/j.chroma.2010.10.040

Cabeza, Y., Candela, L., Ronen, D., & Teijon, G. (2012). Monitoring the occurrence of emerging contaminants in treated wastewater and groundwater between 2008 and 2010. The Baix Llobregat (Barcelona, Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 239–240, 32–39. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.032

Cabrita, I., Ruiz, B., Mestre, A. S., Fonseca, I. M., Carvalho, A. P., & Ania, C. O. (2010). Removal of an analgesic using activated carbons prepared from urban and industrial residues. *Chemical Engineering Journal*, 163(3), 249–255. doi: 10.1016/j.cej.2010.07.058

Calafat, A. M., Kuklennyik, Z., Reidy, J. A., Caudill, S. P., Ekong, J., & Needham, L. L. (2005). Urinary Concentrations of Bisphenol A and 4-Nonylphenol in a Human Reference Population. *Environmental Health Perspectives*, 113(4), 391–395. doi: 10.1289/ehp.7534

Caldas, S., Arias, J., Rombaldi, C., Mello, L., Cerqueira, M., Martins, A., & Primel, E. (2018). Occurrence of Pesticides and PPCPs in Surface and Drinking Water in Southern Brazil: Data on 4-Year Monitoring. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. doi: 10.21577/0103-5053.20180154

Carballa, M., Omil, F., Lema, J. M., Llompart, M., García-Jares, C., Rodríguez, I., Gómez, M., & Ternes, T. (2004). Behavior of pharmaceuticals, cosmetics and hormones in a sewage treatment plant. *Water Research*, 38(12), 2918–2926. doi: 10.1016/j.watres.2004.03.029

Casals-Casas, C., & Desvergne, B. (2011). Endocrine Disruptors: From Endocrine to Metabolic Disruption. *Annual Review of Physiology*, 73(1), 135–162. doi: 10.1146/annurev-physiol-012110-142200

Chen, Y., Yu, K., Hassan, M., Xu, C., Zhang, B., Gin, K. Y.-H., & He, Y. (2018).

Occurrence, distribution and risk assessment of pesticides in a river-reservoir system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 166, 320–327. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.107

Colborn, T., vom Saal, F. S., & Soto, A. M. (1993). Developmental effects of endocrine-disrupting chemicals in wildlife and humans. *Environmental Health Perspectives*, 101(5), 378–384. doi: 10.1289/ehp.93101378

Conkle, J. L., White, J. R., & Metcalfe, C. D. (2008). Reduction of pharmaceutically active compounds by a lagoon wetland wastewater treatment system in Southeast Louisiana. *Chemosphere*, 73(11), 1741–1748. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.09.020

Darbre, P. D. (2022). What Are Endocrine Disrupters and Where Are They Found? In *Endocrine Disruption and Human Health* (pp. 3–29). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-821985-0.00001-3

Daughton, C. G., & Ternes, T. A. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives*, 107(suppl 6), 907–938. doi: 10.1289/ehp.99107s6907

de Godos, I., Muñoz, R., & Guieysse, B. (2012). Tetracycline removal during wastewater treatment in high-rate algal ponds. *Journal of Hazardous Materials*, 229–230, 446–449. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.106

de Melo da Silva, L., Pereira Cavalcante, R., Fabbro Cunha, R., Gozzi, F., Falcao Dantas, R., de Oliveira, S. C., & Machulek, A. (2016). Tolfenamic acid degradation by direct photolysis and the UV-ABC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process: factorial design, kinetics, identification of intermediates, and toxicity evaluation. *Science of The Total Environment*, 573, 518–531. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.139

de Oliveira, M., Frihling, B. E. F., Velasques, J., Filho, F. J. C. M., Cavalheri, P. S., & Migliolo, L. (2020). Pharmaceuticals residues and xenobiotics contaminants: Occurrence, analytical techniques and sustainable alternatives for wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 705, 135568. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135568

de Wilt, A., Butkovskiy, A., Tuantet, K., Leal, L. H., Fernandes, T. V., Langenhoff, A., & Zeeman, G. (2016). Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 84–92. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.033

Escapa, C., Coimbra, R. N., Paniagua, S., García, A. I., & Otero, M. (2017a). Comparison of the culture and harvesting of *Chlorella vulgaris* and *Tetradesmus obliquus* for the removal of pharmaceuticals from water. *Journal of Applied Phycology*, 29(3), 1179–1193. doi: 10.1007/s10811-016-1010-5

Escapa, C., Coimbra, R. N., Paniagua, S., García, A. I., & Otero, M. (2017b). Paracetamol and salicylic acid removal from contaminated water by microalgae. *Journal of Environmental Management*, 203, 799–806. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.06.051

- Escapa, Carla, Coimbra, R. N., Neuparth, T., Torres, T., Santos, M. M., & Otero, M. (2019). Acetaminophen Removal from Water by Microalgae and Effluent Toxicity Assessment by the Zebrafish Embryo Bioassay. *Water*, *11*(9), 1929. doi: 10.3390/w11091929
- Escapa, Carla, Torres, T., Neuparth, T., Coimbra, R. N., García, A. I., Santos, M. M., & Otero, M. (2018). Zebrafish embryo bioassays for a comprehensive evaluation of microalgae efficiency in the removal of diclofenac from water. *Science of The Total Environment*, *640–641*, 1024–1033. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.353
- Escher, B. I., & Fenner, K. (2011). Recent Advances in Environmental Risk Assessment of Transformation Products. *Environmental Science & Technology*, *45*(9), 3835–3847. doi: 10.1021/es1030799
- Feng, L., Watts, M. J., Yeh, D., Esposito, G., & van Hullebusch, E. D. (2015). The Efficacy of Ozone/BAC Treatment on Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drug Removal from Drinking Water and Surface Water. *Ozone: Science & Engineering*, *37*(4), 343–356. doi: 10.1080/01919512.2014.999910
- Fernandez-Fontaina, E., Omil, F., Lema, J. M., & Carballa, M. (2012). Influence of nitrifying conditions on the biodegradation and sorption of emerging micropollutants. *Water Research*, *46*(16), 5434–5444. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.037
- Garcia-Becerra, F. Y., & Ortiz, I. (2018). Biodegradation of Emerging Organic Micropollutants in Nonconventional Biological Wastewater Treatment: A Critical Review. *Environmental Engineering Science*, *35*(10), 1012–1036. doi: 10.1089/ees.2017.0287
- García-Enguádanos, A., Calle, M. ., Valero, J., Luna, S., & Domínguez-Rojas, V. (2002). Risk factors in miscarriage: a review. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, *102*(2), 111–119. doi: 10.1016/S0301-2115(01)00613-3
- Gorito, A. M., Ribeiro, A. R., Almeida, C. M. R., & Silva, A. M. T. (2017). 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. doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.060
- Grover, D. P., Zhou, J. L., Frickers, P. E., & Readman, J. W. (2011). Improved removal of estrogenic and pharmaceutical compounds in sewage effluent by full scale granular activated carbon: Impact on receiving river water. *Journal of Hazardous Materials*, *185*(2–3), 1005–1011. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.10.005
- Hamilton, P. B., Lange, A., Nicol, E., Bickley, L. K., De-Bastos, E. S. R., Jobling, S., & Tyler, C. R. (2015). Effects of Exposure to WwTW Effluents over Two Generations on Sexual Development and Breeding in Roach *Rutilus rutilus*. *Environmental Science & Technology*, *49*(21), 12994–13002. doi: 10.1021/acs.est.5b03777
- Huang, L., Wang, M., Shi, C., Huang, J., & Zhang, B. (2014). Adsorption of tetracycline and ciprofloxacin on activated carbon prepared from lignin with H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activation. *Desalination and Water Treatment*, *52*(13–15), 2678–2687. doi:

10.1080/19443994.2013.833873

Huang, X., Ye, G., Yi, N., Lu, L., Zhang, L., Yang, L., Xiao, L., & Liu, J. (2019). Effect of plant physiological characteristics on the removal of conventional and emerging pollutants from aquaculture wastewater by constructed wetlands. *Ecological Engineering*, *135*, 45–53. doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.05.017

Jin, H., Xie, J., Mao, L., Zhao, M., Bai, X., Wen, J., Shen, T., & Wu, P. (2020). Bisphenol analogue concentrations in human breast milk and their associations with postnatal infant growth. *Environmental Pollution*, *259*, 113779. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113779

Kabir, E. R., Rahman, M. S., & Rahman, I. (2015). A review on endocrine disruptors and their possible impacts on human health. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, *40*(1), 241–258. doi: 10.1016/j.etap.2015.06.009

Kaur, R., Talan, A., Tiwari, B., Pilli, S., Sellamuthu, B., & Tyagi, R. D. (2020). Constructed wetlands for the removal of organic micro-pollutants. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 87–140). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-819594-9.00005-X

Khan, S., Naushad, M., Govarthanan, M., Iqbal, J., & Alfadul, S. M. (2022). Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research. *Environmental Research*, *207*, 112609. doi: 10.1016/j.envres.2021.112609

Kim, H.-K., Ko, D.-H., Lee, W., Kim, K.-R., Chun, S., Song, J., & Min, W.-K. (2021). Body fluid concentrations of bisphenol A and their association with in vitro fertilization outcomes. *Human Fertility*, *24*(3), 199–207. doi: 10.1080/14647273.2019.1612104

Kong, L., Kadokami, K., Wang, S., Duong, H. T., & Chau, H. T. C. (2015). Monitoring of 1300 organic micro-pollutants in surface waters from Tianjin, North China. *Chemosphere*, *122*, 125–130. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.11.025

Krakowiak, R., Musiał, J., Bakun, P., Spychała, M., Czarczynska-Goslinska, B., Mlynarczyk, D. T., Koczorowski, T., Sobotta, L., Stanisiz, B., & Goslinski, T. (2021). Titanium Dioxide-Based Photocatalysts for Degradation of Emerging Contaminants including Pharmaceutical Pollutants. *Applied Sciences*, *11*(18), 8674. doi: 10.3390/app11188674

Liu, Y., Zhao, Y., & Wang, J. (2021). Fenton/Fenton-like processes with in-situ production of hydrogen peroxide/hydroxyl radical for degradation of emerging contaminants: Advances and prospects. *Journal of Hazardous Materials*, *404*, 124191. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124191

Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., Liang, S., & Wang, X. C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, *473–474*, 619–641. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.065

Matamoros, V., Gutiérrez, R., Ferrer, I., García, J., & Bayona, J. M. (2015). Capability of microalgae-based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: A pilot-scale study. *Journal of Hazardous Materials*, *288*, 34–42. doi:

10.1016/j.jhazmat.2015.02.002

McAllister, E. J., Dhurandhar, N. V., Keith, S. W., Aronne, L. J., Barger, J., Baskin, M., Benca, R. M., Biggio, J., Boggiano, M. M., Eisenmann, J. C., Elobeid, M., Fontaine, K. R., Gluckman, P., Hanlon, E. C., Katzmarzyk, P., Pietrobelli, A., Redden, D. T., Ruden, D. M., Wang, C., ... Allison, D. B. (2009). Ten Putative Contributors to the Obesity Epidemic. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 49(10), 868–913. doi: 10.1080/10408390903372599

Melo-Guimarães, A., Torner-Morales, F. J., Durán-Álvarez, J. C., & Jiménez-Cisneros, B. E. (2013). Removal and fate of emerging contaminants combining biological, flocculation and membrane treatments. *Water Science and Technology*, 67(4), 877–885. doi: 10.2166/wst.2012.640

Montagner, C. C., Vidal, C., & Acayaba, R. (2017). Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Química Nova*. doi: 10.21577/0100-4042.20170091

Nie, M., Yan, C., Dong, W., Liu, M., Zhou, J., & Yang, Y. (2015). Occurrence, distribution and risk assessment of estrogens in surface water, suspended particulate matter, and sediments of the Yangtze Estuary. *Chemosphere*, 127, 109–116. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.01.021

Noguera-Oviedo, K., & Aga, D. S. (2016). Lessons learned from more than two decades of research on emerging contaminants in the environment. *Journal of Hazardous Materials*, 316, 242–251. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.04.058

Padhye, L. P., Yao, H., Kung'u, F. T., & Huang, C.-H. (2014). Year-long evaluation on the occurrence and fate of pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disrupting chemicals in an urban drinking water treatment plant. *Water Research*, 51, 266–276. doi: 10.1016/j.watres.2013.10.070

Perondi, Michelon, W., Basso, A., Bohrer, J. K., Viancelli, A., Fonseca, T. G., Treichel, H., Moreira, R. F. P. M., Peralta, R. A., Düsman, E., & Pokrywiecki, T. S. (2020). Degradation of estriol (E3) and transformation pathways after applying photochemical removal processes in natural surface water. *Water Science and Technology*, 82(7), 1445–1453. doi: 10.2166/wst.2020.411

Plöhn, M., Spain, O., Sirin, S., Silva, M., Escudero-Oñate, C., Ferrando-Climent, L., Allahverdiyeva, Y., & Funk, C. (2021). Wastewater treatment by microalgae. *Physiologia Plantarum*, 173(2), 568–578. doi: 10.1111/ppl.13427

Prieto-Rodríguez, L., Oller, I., Klamerth, N., Agüera, A., Rodríguez, E. M., & Malato, S. (2013). Application of solar AOPs and ozonation for elimination of micropollutants in municipal wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, 47(4), 1521–1528. doi: 10.1016/j.watres.2012.11.002

Reichert, G., Hilgert, S., Fuchs, S., & Azevedo, J. C. R. (2019). Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America. *Environmental Pollution*, 255, 113140. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113140

Richardson, S. D., & Ternes, T. A. (2018). *Water Analysis: Emerging Contaminants*

- and Current Issues. *Analytical Chemistry*, *90*(1), 398–428. doi: 10.1021/acs.analchem.7b04577
- 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. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.07.059
- Rochester, J. R. (2013). Bisphenol A and human health: A review of the literature. *Reproductive Toxicology*, *42*, 132–155. doi: 10.1016/j.reprotox.2013.08.008
- Rolli, E., Vergani, L., Ghitti, E., Patania, G., Mapelli, F., & Borin, S. (2021). ‘Cry-for-help’ in contaminated soil: a dialogue among plants and soil microbiome to survive in hostile conditions. *Environmental Microbiology*, *23*(10), 5690–5703. doi: 10.1111/1462-2920.15647
- Rout, P. R., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2016). Development of an integrated system for the treatment of rural domestic wastewater: emphasis on nutrient removal. *RSC Advances*, *6*(54), 49236–49249. doi: 10.1039/C6RA08519A
- Ruiz, B., Cabrita, I., Mestre, A. S., Parra, J. B., Pires, J., Carvalho, A. P., & Ania, C. O. (2010). Surface heterogeneity effects of activated carbons on the kinetics of paracetamol removal from aqueous solution. *Applied Surface Science*, *256*(17), 5171–5175. doi: 10.1016/j.apsusc.2009.12.086
- Salgado, R., Marques, R., Noronha, J. P., Carvalho, G., Oehmen, A., & Reis, M. A. M. (2012). Assessing the removal of pharmaceuticals and personal care products in a full-scale activated sludge plant. *Environmental Science and Pollution Research*, *19*(5), 1818–1827. doi: 10.1007/s11356-011-0693-z
- Samaras, V. G., Stasinakis, A. S., Mamais, D., Thomaidis, N. S., & Lekkas, T. D. (2013). Fate of selected pharmaceuticals and synthetic endocrine disrupting compounds during wastewater treatment and sludge anaerobic digestion. *Journal of Hazardous Materials*, *244–245*, 259–267. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.039
- Sarkar, S., Ali, S., Rehmann, L., Nakhla, G., & Ray, M. B. (2014). Degradation of estrone in water and wastewater by various advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, *278*, 16–24. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.05.078
- Schönfelder, G., Wittfoht, W., Hopp, H., Talsness, C. E., Paul, M., & Chahoud, I. (2002). Parent bisphenol A accumulation in the human maternal-fetal-placental unit. *Environmental Health Perspectives*, *110*(11). doi: 10.1289/ehp.110-1241091
- Shahid, M. K., Kashif, A., Fuwad, A., & Choi, Y. (2021). Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. *Coordination Chemistry Reviews*, *442*, 213993. doi: 10.1016/j.ccr.2021.213993
- Silva, A., Delerue-Matos, C., Figueiredo, S., & Freitas, O. (2019). The Use of Algae and Fungi for Removal of Pharmaceuticals by Bioremediation and Biosorption Processes: A Review. *Water*, *11*(8), 1555. doi: 10.3390/w11081555

Somm, E., Schwitzgebel, V. M., Toulotte, A., Cederroth, C. R., Combescure, C., Nef, S., Aubert, M. L., & Hüppi, P. S. (2009). Perinatal Exposure to Bisphenol A Alters Early Adipogenesis in the Rat. *Environmental Health Perspectives*, *117*(10), 1549–1555. doi: 10.1289/ehp.11342

Song, H.-L., Nakano, K., Taniguchi, T., Nomura, M., & Nishimura, O. (2009). Estrogen removal from treated municipal effluent in small-scale constructed wetland with different depth. *Bioresource Technology*, *100*(12), 2945–2951. doi: 10.1016/j.biortech.2009.01.045

Sotelo, J. L., Rodríguez, A. R., Mateos, M. M., Hernández, S. D., Torrellas, S. A., & Rodríguez, J. G. (2012). Adsorption of pharmaceutical compounds and an endocrine disruptor from aqueous solutions by carbon materials. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, *47*(7), 640–652. doi: 10.1080/03601234.2012.668462

Stasinakis, A. S., Kordoutis, C. I., Tsiouma, V. C., Gatidou, G., & Thomaidis, N. S. (2010). Removal of selected endocrine disruptors in activated sludge systems: Effect of sludge retention time on their sorption and biodegradation. *Bioresource Technology*, *101*(7), 2090–2095. doi: 10.1016/j.biortech.2009.10.086

Stasinakis, A. S., Kotsifa, S., Gatidou, G., & Mamais, D. (2009). Diuron biodegradation in activated sludge batch reactors under aerobic and anoxic conditions. *Water Research*, *43*(5), 1471–1479. doi: 10.1016/j.watres.2008.12.040

Stasinakis, A. S., Thomaidis, N. S., Arvaniti, O. S., Asimakopoulos, A. G., Samaras, V. G., Ajibola, A., Mamais, D., & Lekkas, T. D. (2013). Contribution of primary and secondary treatment on the removal of benzothiazoles, benzotriazoles, endocrine disruptors, pharmaceuticals and perfluorinated compounds in a sewage treatment plant. *Science of The Total Environment*, *463–464*, 1067–1075. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.087

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. doi: 10.1016/j.watres.2010.02.040

Sutzkover-Gutman, I., Hasson, D., & Semiat, R. (2010). Humic substances fouling in ultrafiltration processes. *Desalination*, *261*(3), 218–231. doi: 10.1016/j.desal.2010.05.008

Tabb, M. M., & Blumberg, B. (2006). New Modes of Action for Endocrine-Disrupting Chemicals. *Molecular Endocrinology*, *20*(3), 475–482. doi: 10.1210/me.2004-0513

Tiwari, B., Sellamuthu, B., Ouarda, Y., Drogui, P., Tyagi, R. D., & Buelna, G. (2017). Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach. *Bioresource Technology*, *224*, 1–12. doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.042

Tolboom, S. N., Carrillo-Nieves, D., de Jesús Rostro-Alanis, M., de la Cruz Quiroz, R., Barceló, D., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldivar, R. (2019). Algal-based removal strategies for hazardous contaminants from the environment – A review. *Science of The Total Environment*, *665*, 358–366. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.129



- Torres-Pérez, J., Gérente, C., & Andrès, Y. (2012). Sustainable Activated Carbons from Agricultural Residues Dedicated to Antibiotic Removal by Adsorption. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(3), 524–529. doi: 10.1016/S1004-9541(11)60214-0
- 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. doi: 10.1016/j.watres.2017.12.029
- Vallejo-Rodríguez, R., Murillo-Tovar, M., Navarro-Laboulais, J., León-Becerril, E., & López-López, A. (2014). Assessment of the kinetics of oxidation of some steroids and pharmaceutical compounds in water using ozone. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 316–323. doi: 10.1016/j.jece.2013.12.024
- Viancelli, A., Avalos, D. M., Reis, P., Málaga, P. R. S., Shah, M. P., Dwivedi, N., & Michelon, W. (2023). The Impact of 17 $\beta$ -estradiol (E2) on the Growth Profile of Environmental Enterobacteriaceae. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(1), 20. doi: 10.1007/s11270-022-06036-3
- Viancelli, A., Michelon, W., Rogovski, P., Cadamuro, R. D., de Souza, E. B., Fongaro, G., Camargo, A. F., Stefanski, F. S., Venturin, B., Scapini, T., Bonatto, C., Preczeski, K. P., Klanovicz, N., de Oliveira, D., & Treichel, H. (2020). A review on alternative bioprocesses for removal of emerging contaminants. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 43(12), 2117–2129. doi: 10.1007/s00449-020-02410-9
- Villegas-Guzman, P., Silva-Agredo, J., Giraldo-Aguirre, A. L., Flórez-Acosta, O., Petrier, C., & Torres-Palma, R. A. (2015). Enhancement and inhibition effects of water matrices during the sonochemical degradation of the antibiotic dicloxacillin. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 211–219. doi: 10.1016/j.ultsonch.2014.07.006
- Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169, 106318. doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106318
- Wetherill, Y. B., Akingbemi, B. T., Kanno, J., McLachlan, J. A., Nadal, A., Sonnenschein, C., Watson, C. S., Zoeller, R. T., & Belcher, S. M. (2007). In vitro molecular mechanisms of bisphenol A action. *Reproductive Toxicology*, 24(2), 178–198. doi: 10.1016/j.reprotox.2007.05.010
- Xiang, L., Xie, Z., Guo, H., Song, J., Li, D., Wang, Y., Pan, S., Lin, S., Li, Z., Han, J., & Qiao, W. (2021). Efficient removal of emerging contaminant sulfamethoxazole in water by ozone coupled with calcium peroxide: Mechanism and toxicity assessment. *Chemosphere*, 283, 131156. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131156
- Xu, M., Huang, H., Li, N., Li, F., Wang, D., & Luo, Q. (2019). Occurrence and ecological risk of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and pesticides in typical surface watersheds, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 175, 289–298. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.131
- Yang, J., Zhao, Y., Li, M., Du, M., Li, X., & Li, Y. (2019). A Review of a Class of Emerging Contaminants: The Classification, Distribution, Intensity of Consumption,