

# AGENDA POLÍTICA PÚBLICA

VOLUME 17, DEZEMBRO 2024

GovAmb  
GOVERNANÇA AMBIENTAL



IEE USP  
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE

ProASaS

USP

## USO DE MEMBRANAS COMO ALTERNATIVA PARA REMOÇÃO DE FÁRMACOS EM EFLUENTES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

FABIO PEREIRA DE CARVALHO e WANDERLEY DA SILVA PAGANINI

### PRINCIPAIS MENSAGENS

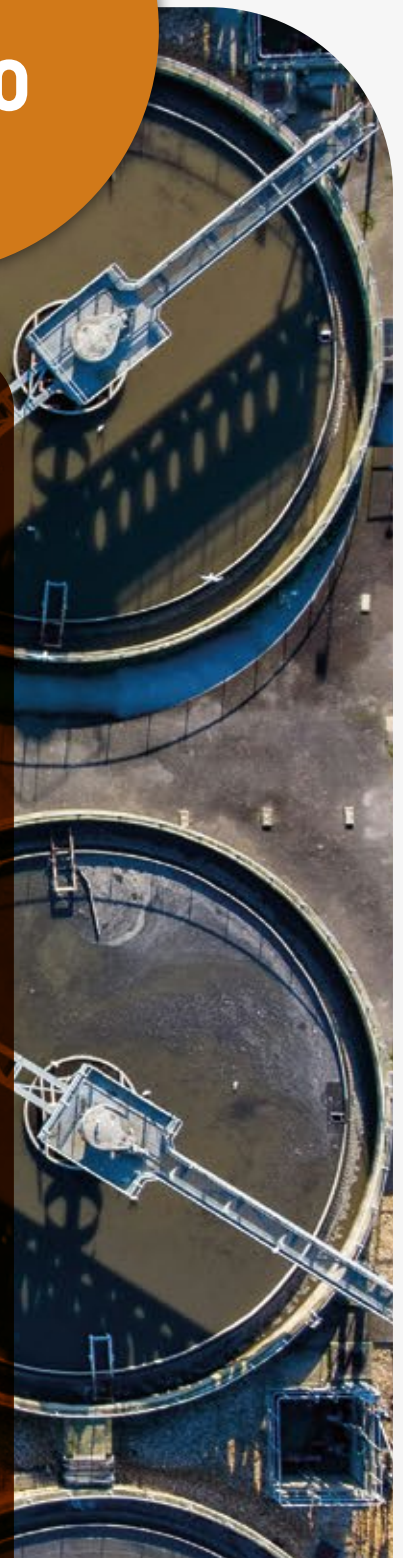
Deficiências nos Sistemas de Tratamento de Esgotos: Os sistemas de tratamento de esgotos sanitários no Brasil têm dificuldades em remover contaminantes emergentes que não são eficazmente eliminados pelas tecnologias de tratamento biológico tradicionais.

A inclusão de sistemas de membranas de ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa como etapas de polimento podem aumentar significativamente a eficiência na remoção de contaminantes emergentes, como por exemplo os fármacos.

Um dos principais desafios quando trabalhamos com contaminantes emergentes é a tecnologia analítica para quantificação de concentrações muito baixas. A técnica de cromatografia líquida de alta eficiência acoplada à espectrometria de massas (LC-MS/MS) permitiu estabelecer uma metodologia de análise de fármacos com limites de quantificação baixos de até 0,1 ppb.

A carbamazepina, por exemplo, fármaco reconhecidamente recalcitrante, não foi removido em nenhuma estação de tratamento de esgoto, sendo o sistema de membranas com osmose reversa uma etapa importante para sua remoção. O atenolol, por outro lado, apresentou comportamento diferente, com remoção elevada no sistema de lagoas e baixa remoção no sistema de lodos ativados. Neste sentido, a membrana de nanofiltração demonstrou ser importante barreira para evitar contaminação de corpos d'água por esse fármaco.

Esse documento é resultado do projeto apresentado ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade. de Mestrado Profissional (2021) "Uso de membranas como alternativa para remoção de fármacos em efluentes de estações de tratamento de esgotos". Autor Fabio Pereira de Carvalho e orientador Prof. Dr. Wanderley da Silva Paganini





Autores:  
Fabio Pereira de Carvalho  
Wanderley da Silva Paganini

Universidade de São Paulo  
Reitor: Carlos Gilberto Carlotti Junior  
Vice-reitora: Maria Arminda do Nascimento Arruda  
Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de  
São Paulo  
Diretor: Prof. Dr. Tércio Ambrizzi  
Vice-diretor: Prof. Dr. Ildo Sauer

## FICHA CATALOGRÁFICA

C331 Carvalho, Fabio Pereira de. Uso de membranas como alternativa para remoção de fármacos em efluentes de estações de tratamento de esgotos. [recurso eletrônico] / Fabio Pereira de Carvalho, Wanderley da Silva Paganini; coordenação Pedro Roberto Jacobi. -- São Paulo: IEE-USP, 2024. v. 17: il. 30 cm. (Série: Agenda política pública, v.17, abr. 2024)

ISBN 978-65-88109-51-9 DOI 10.5281/zenodo.14527356

1. Esgotos sanitários - Tratamento. I. Carvalho, Fabio Pereira de. II. Paganini, Wanderley da Silva. III. Título. IV. Série.

CDU 502.131.1

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

©2024 IEE-USP  
Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida,  
desde que sempre se cite a fonte.



## FÁRMACOS NO ESGOTO

O crescente uso de fármacos e o constante desenvolvimento de novas moléculas todos os anos representa um avanço em termos de novas terapias para diferentes doenças, contudo o uso em excesso e descarte inadequado geram preocupações em diferentes partes do mundo. Os impactos ambientais, à fauna, e à saúde humana muitas vezes não são totalmente conhecidos e elucidados, assim é extremamente importante entender os riscos associados à essas substâncias e forma de mitigação de tais impactos potenciais.

Os estudos da presença de fármacos nos esgotos vêm crescendo mundialmente, porém ainda não possuem a mesma extensão no Brasil. Em geral, estes estudos possuem grande variabilidade de resultados na ocorrência e concentração dos fármacos em diferentes matrizes ambientais. Entre os maiores desafios da atualidade podemos destacar a questão das substâncias que são suspeitas de alterar as funções do sistema endócrino causando efeitos negativos à saúde, os chamados perturbadores endócrinos.

O controle das fontes de poluição por fármacos, seria a princípio, a situação ideal. Porém a dificuldade de controlar o consumo de medicamentos, identificação de pontos de descarte, e a inerente excreção dos fármacos e seus metabólitos, transfere o problema para o esgoto. Apesar de muitos destes compostos serem identificados em águas superficiais e água potável, uma das principais rotas de contaminação está relacionada ao despejo de esgoto ou efluentes industriais sem tratamento, ou até mesmo com diferentes níveis de tratamento, que tipicamente não são projetados para remoção deste tipo de contaminante. As rotas típicas dos fármacos no meio ambiente estão representadas na Figura 1.

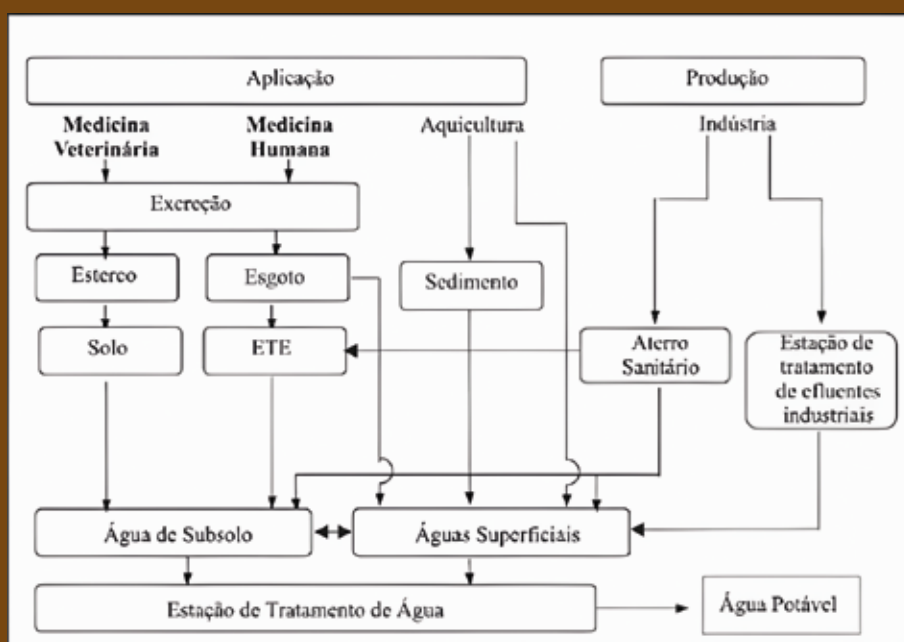


Figura 1. Rotas dos fármacos no meio ambiente (Fonte: MISTURA & LOPES, 2011)

Os processos de tratamento podem reduzir substancialmente as concentrações de fármacos, no entanto, o grau de eficácia depende da estrutura química, custos e energia. Todos os processos de tratamento apresentam vantagens e desvantagens, como a geração de resíduos ou subprodutos e devem ser realizadas análises completas de ciclo de vida para garantir que as soluções apresentadas não sejam piores do que o próprio problema.

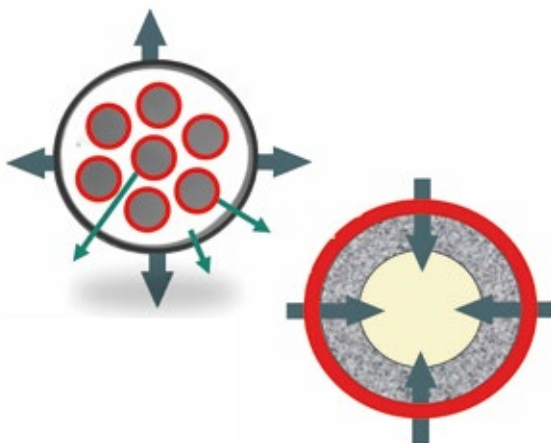
Atualmente os processos de separação por membranas (PSM) são um dos tipos de tratamento mais promissores no tratamento de água e esgotos, principalmente quando há necessidade de elevada remoção de contaminantes sobretudo aqueles presentes em baixas concentrações, mas que podem causar efeitos adversos. A inovação constante na criação de membranas mais eficientes, com custos de implantação e operação cada vez mais atrativos tem contribuído para a disseminação destas tecnologias.

## TIPOS DE MEMBRANAS USADAS NO TRATAMENTO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

O uso de membranas vem crescendo em aplicações de polimento e principalmente em sistemas de reúso para uso em recargas de aquíferos, potabilização (indireto ou direto) e industrial. Esse tipo de tecnologia, muito aplicado na área industrial, vindo sendo estudado e aplicado em diversas ETEs no mundo, com foco na produção de efluente de qualidade, permitindo melhorias de qualidade nos corpos d'água, quantidade disponibilização de mais água para processos industriais, irrigação e, como mencionado, até potabilização.

A ultrafiltração fornece separação macromolecular para partículas na faixa de 20 a 1.000 Angstrom (até 0,1 microm). Todos os sais dissolvidos e moléculas menores passam através da membrana. A maioria das membranas de UF possuem corte de peso molecular (molecular weight cut-off – MWCO) entre 1.000 e 100.000. As membranas de fibra oca tipicamente operam em dois tipos de sentido: de fora para dentro ou de dentro para fora, conforme observado na figura 2.

Desta forma, todos os sólidos suspensos e contaminantes com tamanho molecular acima do poro da membrana são separados da corrente de água filtrada. Nas versões pressurizadas, conforme figura 3, a água é bombeada para permitir que a água passe pelos poros, enquanto os contaminantes suspensos ficam retidos dentro do módulo.



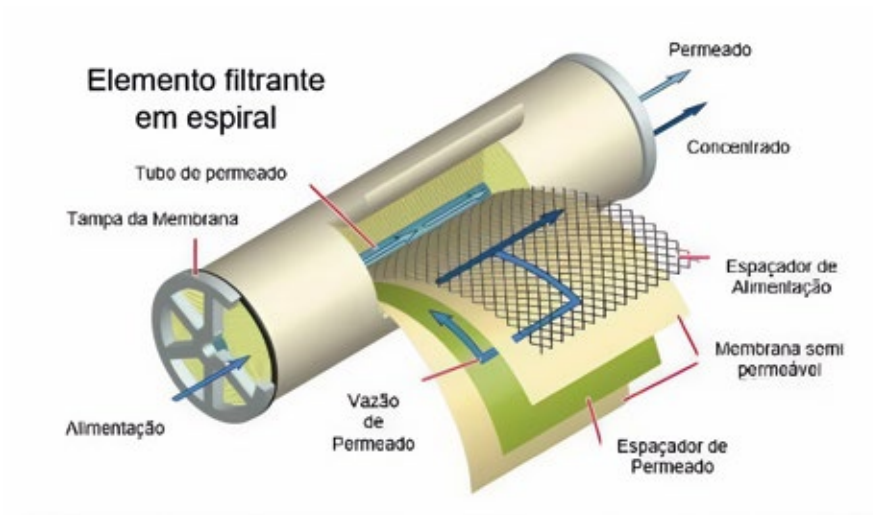
**Figura 2.** Sentidos de filtração típicos de membranas de ultrafiltração (Fonte: DuPont)



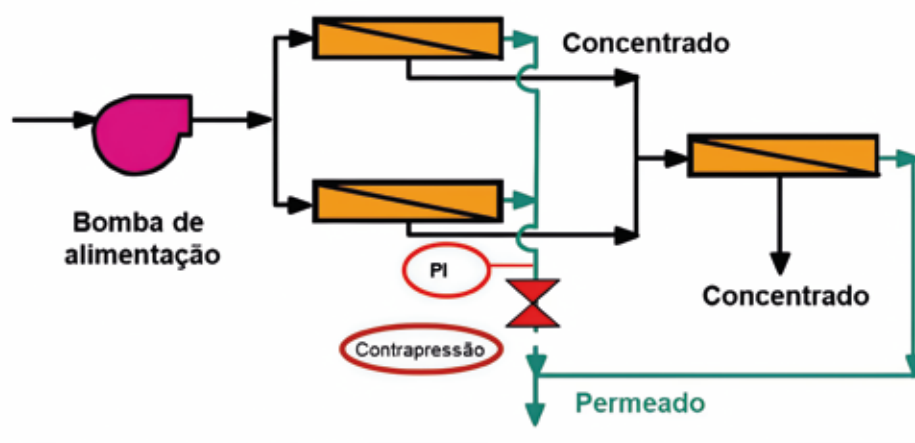
**Figura 3.** Diferentes tipos de membranas de ultrafiltração pressurizadas (Fonte: DuPont)

A nanofiltração é um processo de membrana que rejeita partículas de aproximadamente 1 nanômetro, operando entre a ultrafiltração e a osmose reversa. Utiliza membranas em um sistema de filtração de fluxo cruzado ou tangencial, com diferentes camadas e materiais. A água ou efluente clarificado é bombeado sob alta pressão para o sistema de membrana, onde é dividido em permeado (baixo teor de sais) e concentrado (alto teor de sais).

Uma válvula controla a proporção de água que se torna concentrado e permeado. Sistemas de múltiplos estágios podem ser usados para aumentar a recuperação e reduzir a geração de concentrado, com o concentrado de um estágio alimentando o próximo e o permeado sendo misturado para obter um produto final com menor teor de sais., conforme representado na figura 5.



**Figura 4.** Detalhamento das partes de uma membrana de nanofiltração ou osmose reversa (Fonte: DuPont)



**Figura 5.** Exemplo de um sistema de membranas com dois estágios (Fonte: DuPont)

As membranas de nanofiltração (NF) rejeitam moléculas orgânicas com pesos moleculares maiores que 200-400 e certos sais solúveis. As pressões típicas de operação estão entre 3,5 e 16 bar. A membrana ideal de NF tem alta permeabilidade à água e baixa permeabilidade aos solutos, dependendo da aplicação. As aplicações incluem remoção de cor e carbono orgânico total de águas superficiais, remoção de dureza de água subterrânea, redução parcial de sólidos dissolvidos totais e remoção de contaminantes emergentes como agroquímicos e fármacos. Um exemplo real de equipamento de nanofiltração está na figura 6.



**Figura 6.** Exemplo de um equipamento de nanofiltração (Fonte: HOH Water Technology)

A osmose reversa (OR) é o melhor nível de filtração disponível entre as membranas. A membrana de OR atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas, bem como moléculas orgânicas com um peso molecular superior a aproximadamente 100.

Moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da membrana criando um fluxo de produto purificado. A rejeição de sais dissolvidos é tipicamente de 95% a 99%. O modo de operação é similar a um sistema de nanofiltração, porém as pressões de trabalho são maiores e dependem da salinidade de água de alimentação. As pressões de trabalho tipicamente variam de:

- 6 até 41 bar com membranas de água salobra, Brackish water reverse osmosis – BWRO;
- Até 83 bar com membranas de água do mar, Seawater reverse osmosis – SWRO;
- Até 120 bar com membranas de elevada pressão, Ultra high pressure reverse osmosis – UHPRO
- A recuperação típica (em % - vazão de permeado produzido dividida pela vazão de água de alimentação) tipicamente varia de acordo com a salinidade e tipo de sistema:
  - Dessalinização de água do mar: 40 a 45%;
  - Água salobra (efluentes ou alto potencial de incrustação de sais): 60 – 70%
  - Água salobra com duplo estágio: 75 – 80%
  - Água permeada ou múltiplos estágios (baixa salinidade): 85 – 90%
  - Osmose de circuito fechado (closed circuit reverse osmosis – CCRO): 90 a 98%

As aplicações para osmose são numerosas e variadas, e incluem dessalinização de água do mar ou água salobra, reúso de efluentes, processamento de alimentos e bebidas, separações biomédicas, purificação de água potável, água industrial e sistema de descarga líquida zero (zero liquid discharge – ZLD) ou descarga mínima de líquidos (minimal liquid discharge – MLD).

## RESULTADOS OBTIDOS COM MEMBRANAS DE UF, NF E OR

Na etapa de polimento final dos efluentes das ETEs foram considerados e avaliados três tipos de membranas: ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR). Em cada ETE, a ultrafiltração serviu como pré-tratamento e proteção para as membranas de NF (ETE de lodos ativados) e OR (ETE de lagoas – anaeróbia, facultativa e maturação). Alguns aspectos importantes devem ser levados em conta na implementação desse tipo de solução.

O principal deles, sem dúvida, são os riscos sanitários envolvidos no retorno de esgotos tratados ao meio ambiente, que consequentemente podem afetar os corpos hídricos que podem servir como fonte de água para abastecimento humano, ou em último caso, causar impactos negativos no solo, subsolo e ambiente marinho. É importante lembrar que esse risco já existe e vem causando diversos problemas à população.

É sabido que as fontes de água disponíveis para abastecimento nas grandes cidades brasileiras estão sujeitas às diferentes fontes de poluição e, faz-se necessário buscar tecnologias para lidar

com o problema de contaminação de águas por esgotos contaminados.

A técnica analítica de LC-MS/MS demonstrou ser uma potente ferramenta para identificação e quantificação dos fármacos, alcançando limites de quantificação da ordem de 0,1 ppb;

Os resultados obtidos são válidos apenas para a fração líquida, já que há necessidade de filtração para proteção dos equipamentos analíticos; Alguns fármacos como o clonazepam e sinvastatina não foram identificados pela metodologia aplicada, provavelmente devido ao seu uso controlado e baixas dosagens terapêuticas, respectivamente;

O sistema de lagoas de estabilização, com sua configuração anaeróbia, seguida de facultativa e finalmente maturação, permitiu a remoção apenas parcial de nutrientes como fósforo e nitrogênio. Devido à presença elevada de algas foi preciso desenhar o sistema com o uso de membranas de UF para proteção das membranas de NF e OR, que realmente são as mais indicadas para remoção de contaminantes como fármacos e outros compostos dissolvidos;

## SISTEMA DE LAGOAS

No esgoto da ETE de lagoas foram encontradas elevadas concentrações de alguns fármacos, notadamente cafeína (575 e 359 ppb) e paracetamol (12,9 e 78,5 ppb) já esperado pelo uso recorrente e sem prescrição médica, além da presença de efluente hospitalares que também contribuem para maiores concentrações de fármacos no esgoto bruto. Também foram identificados a carbamazepina (1,22 e 0,88 ppb), ibuprofeno (2,7 e 4,34 ppb) e atenolol (2,75 e 3,41 ppb)

Com respeito aos fármacos, com os altos tempos de TDH, permitiram que as lagoas fossem eficientes para remoção de alguns dos fármacos estudados, como o paracetamol, ibuprofeno e cafeína com remoções próximas a 100%, podendo ser considerados de alta biodegradabilidade. Para o atenolol as remoções também foram consideradas boas (65 e 92% na lagoa anaeróbia). Já para a carbamazepina, composto já conhecido pela baixa biodegradabilidade, não houve remoção significativa.

Com relação às membranas de ultrafiltração, observou-se baixa eficiência de remoção dos fármacos no filtrado da UF (quando foram detectados por ineficiência da ETE ou quando foram liberados no processo de tratamento) nos casos da carbamazepina (10,8% e 6%) e cafeína (38,8% e 44,4%). Já a osmose reversa, permitiu, como esperado, a remoção completa destes compostos, com valores abaixo do limite de detecção do método (0,1 ppb).

Importante mencionar a possibilidade de liberação de alguns fármacos no processo de tratamento, este fenômeno pode ocorrer devido à ressolubilização dos fármacos na fase líquida, provenientes da fase sólida (lodo). Desta forma, o estudo da fase sólida é de extrema importância para o entendimento do comportamento dos fármacos em ETEs

## SISTEMA DE LODOS ATIVADOS

No sistema de lodos ativados, foram encontrados altos valores de paracetamol (39,9 e 25,5 ppb) e cafeína (135,0 e 84,4 ppb), valores médios menores que o esgoto da ETE de lagoas, comportamento esperado pela contribuição do esgoto hospitalar naquele sistema. Também foram identificados a carbamazepina (0,34 e 1,62 ppb), ibuprofeno (4,3 e 2,9 ppb) e atenolol (2,19 e 1,65 ppb).

O sistema de lodos ativados, assim como as lagoas, alcançou eficiências elevadas na remoção de cafeína, paracetamol e ibuprofeno (> 99%, indicando que a biodegradabilidade destes compostos não foi impactada significativamente pelo tipo de processo de tratamento biológico. Com relação ao atenolol, as remoções foram um pouco menores (68 e 48%), que nas lagoas, talvez pelo menor TDH nos lodos ativados. Já para carbamazepina, houve liberação nas duas amostragens, indicando que esse mecanismo é o predominante frente à degradação do composto de difícil remoção.

A membrana da NF permitiu a remoção parcial os três fármacos: carbamazepina (5 e 72%), atenolol (52 e 100%) e cafeína (27 e 56%).

Os resultados obtidos indicam que as membranas podem ser eficazes no polimento de efluentes de ETEs existentes, especialmente onde há necessidade de remoção de fármacos e outros contaminantes. Para trabalhos futuros, recomenda-se focar na operação contínua desses sistemas, a fim de entender as variações sazonais na qualidade do esgoto bruto e na eficiência das membranas, que podem perder permeabilidade e capacidade de rejeição devido ao entupimento e às limpezas químicas.

Do ponto de vista econômico, é fundamental avaliar cada ETE individualmente para determinar a necessidade real de um sistema de polimento mais avançado. É essencial definir o propósito do uso desse tipo de sistema, seja para atender à legislação ou para reuso, a fim de determinar a viabilidade econômica e a qualidade necessária para a aplicação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**CARVALHO, Fabio Pereira de.** Uso de membranas como alternativa para remoção de fármacos em efluentes de estações de tratamento de esgotos. 2021. Dissertação (Mestrado em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. doi:10.11606/D.6.2021.tde-16052022-171342

**DUPONT, FilmTec™** Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, 2020

**HEBERER, T,** Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water, 2002. Journal of Hydrology, Volume 266, Issues 3-4, 139-284

**METCALF & EDDY, Inc.** Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Boston :McGraw-Hill, 2003

**NATIONAL ASSOCIATION OF CLEAN WATER AGENCIES (NACWA).** Report: Pharmaceuticals in the Water Environment, 2010

**WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO, 2011.** Pharmaceuticals in Drinkingb water

## SOBRE OS AUTORES

### Fabio Pereira de Carvalho

Especialista em Suporte Técnico e Desenvolvimento da DuPont Water & Solutions (DWS). Atualmente responsável técnico pelo desenvolvimento de novos mercados e aplicações para todo portfólio da DWS, como membranas de Ultrafiltração e MBR, Membranas de Nanofiltração e Osmose reversa, Resinas de troca iônica, Absorventes, Catalisadores e eletrodeionização. Alocado em São Paulo, Fabio tem foco no atendimento e suporte técnico ao mercado brasileiro, além de suporte regional para América Latina. Tem atuação no mercado de água e tratamento de água/efluentes desde 2010. Bacharel em Química Ambiental pela Universidade de São Paulo - USP (2013), Mestre em Ciências (Programa Meio

### Contato

**Fabio Pereira de Carvalho** - fabio.pereira.carvalho@usp.br  
**Wanderley da Silva Paganini** - paganini@usp.br

Ambiente, Saúde e Sustentabilidade) pela Faculdade de Saúde Pública da USP (2021) e Doutorando em Ciências (Programa Meio Ambiente, Saúde e Sustentabilidade) da Faculdade de Saúde Pública da USP (2024-2027).

### Wanderley da Silva Paganini

Engenheiro Civil pela UNESP (Bauru), Engenheiro Sanitarista, Mestre e Doutor em Saúde Pública e Livre-Docente pela Faculdade de Saúde Pública da USP, onde é como Professor Livre-Docente no Departamento de Saúde Ambiental. Com uma carreira de 42 anos na Sabesp, criou a Superintendência de Gestão Ambiental em 2007, atuando como superintendente até 2020. Participou como membro titular do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA).

**AGENDA POLÍTICA PÚBLICA** é uma série de textos com recomendações de políticas públicas em temas socioambientais, publicada pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Este documento compõe a edição de seis volumes da série que foram produzidos a partir de pesquisas e produção técnico-tecnológica do Programa de Pós-graduação Profissional em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade - ProASaS/USP. A comissão editorial responsável por este volume é composta por Leandro Luiz Giatti e Thiago Nogueira, professores da Faculdade de Saúde Pública da USP, Arisnandes Antônio da Silva, doutorando no ProASaS/USP e pelo professor Pedro Roberto Jacobi, coordenador do GovAmb IEE/USP.