



## A importância da Gestão de Micropoluentes em uma Estação de Tratamento de Efluentes Avançada na Região Amazônica

 Priscila Pauly Ribas<sup>1</sup>  Erickson Oliveira dos Santos<sup>2</sup>  Cleideane Cunha Costa<sup>3</sup>  
 Pedro Luiz Sosa González<sup>4</sup>

Cite como - American Psychological Association (APA)

Ribas, P. P., Santos, E. O., Costa, C. C., & Sosa González, P. L. (2023). A importância da Gestão de Micropoluentes em uma Estação de Tratamento de Efluentes Avançada na Região Amazônica. *J. Environ. Manag. & Sust.*, 12(1), 1-29, e22689. <https://doi.org/10.5585/2023.22689>

**Objetivo do estudo:** O estudo visa determinar a dinâmica de descarga de micropoluentes no rio Amazonas a partir de uma ETE avançada e discutir a importância da gestão na minimização dos impactos.

**Metodologia:** Foram analisados 13 micropoluentes: ibuprofeno (IBP), paracetamol (PCM), atenolol (ATL), loratadina (LTD), cloridrato de fexofenadina (FXF), amoxicilina (AMX), 17 $\alpha$ -ethynil estradiol (EE2), cafeína (CAF), diclofenaco de sódio (DCF), estrona (E1), estriol (E3), bisfenol A (BPA), and bis(2-etilexil) ftalato (DEHP) em amostras de efluente vindas de diferentes estágios de tratamento de uma ETE com tecnologias de tratamento avançado, em diferentes períodos do dia. A presença de micropoluentes e sua quantificação foram realizadas usando técnicas de CL-EM e CG-EM.

**Originalidade/Relevância:** Este é o primeiro estudo realizado em uma ETE de Manaus, cidade brasileira que está localizada em um dos mais extensos sistemas fluviais do mundo. Os dados obtidos são importantes para compreender o comportamento da descarga de micropoluentes no rio Amazonas e suas implicações.

**Principais resultados:** Depois do tratamento, os micropoluentes paracetamol, cloridrato de fexofenadina, cafeína, diclofenaco de sódio, e, bis (2-etilexil) ftalato foram detectados no efluente final.

**Contribuições:** Os resultados obtidos neste estudo indicam a necessidade de um gerenciamento integrado, considerando abordagens técnicas, governamentais, organizacionais e comunitárias para minimizar os efeitos da descarga de micropoluentes no meio ambiente.

**Palavras-chave:** micropoluentes; remoção; efluente; tecnologias; gerenciamento integrado.

### The Importance of the Management of Micropollutants in an Advanced Wastewater Treatment Plant in the Amazon

#### Abstract

<sup>1</sup> Samsung Eletrônica da Amazônia (SEDA-M) / Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia, Doutora em Microbiologia Agrícola e do Ambiente - Manaus (AM) – Brasil - [priscila.pauly@gmail.com](mailto:priscila.pauly@gmail.com) ou [priscila.p@samsung.com](mailto:priscila.p@samsung.com)

<sup>2</sup> Samsung Eletrônica da Amazônia (SEDA-M) / Graduado em Tecnologia em Processos Químicos com Doutorado em Química Analítica. Manaus (AM) – Brasil - [eos.quimico@gmail.com](mailto:eos.quimico@gmail.com) ou [erickson.o@samsung.com](mailto:erickson.o@samsung.com)

<sup>3</sup> Samsung Eletrônica da Amazônia (SEDA-M) / Engenheira Ambiental e Sanitarista - Manaus (AM) – Brasil - [cleideanecunha.costa@gmail.com](mailto:cleideanecunha.costa@gmail.com) ou [cleide.c@samsung.com](mailto:cleide.c@samsung.com)

<sup>4</sup> Samsung Eletrônica da Amazônia (SEDA-M) / Engenheiro Agrícola com Mestrado em Irrigação e Drenagem Agrícola / Manaus (AM) – Brasil - [pedro53791@gmail.com](mailto:pedro53791@gmail.com) ou [pedro.sosa@samsung.com](mailto:pedro.sosa@samsung.com)





**Objective:** This study aims to determine the dynamics of the discharge of micropollutants in the Amazon River from an advanced wastewater treatment plant (WWTP) and discusses the importance of management in order to minimize impacts.

**Methodology:** A total of 13 micropollutants: ibuprofen (IBP), paracetamol (PCM), atenolol (ATL), loratadine (LTD), fexofenadine hydrochloride (FXF), amoxicillin (AMX), 17 $\alpha$ -ethynyl estradiol (EE2), caffeine (CAF), sodium diclofenac (DCF), estrone (E1), estriol (E3), bisphenol A (BPA), and bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) were analyzed in effluent samples that came from different treatment stages of a WWTP with advanced treatment technology at different periods of the day. The presence of micropollutants and their quantification were obtained using LC-MS and GC-MS techniques.

**Originality/Relevance:** This is the first study carried out at a WWTP in Manaus, a city in Brazil that is located within one of the most extensive fluvial system in the world. The data obtained are important for understanding the dynamics of the discharge of micropollutants into the Amazon River and its implications.

**Main results:** After the treatment process, the micropollutants paracetamol, fexofenadine hydrochloride, caffeine, sodium diclofenac, and bis(2-ethylhexyl) phthalate were detected in the final effluent.

**Contributions:** The results obtained in this study indicate the need for integrated management, considering technical, governmental, organizational and community-based approaches to minimize the effects of the discharge of micropollutants into the environment.

**Keywords:** micropollutants; removal; wastewater; technologies; integrated management.

## Importancia del manejo de los Micropoluentes en un Sistema Avanzado de Tratamiento de Efluentes en la Región Amazónica

### Resumen

**Objetivo del estudio:** Este estudio tiene como objetivo determinar la dinámica de la descarga de Micropoluentes en el Río Amazonas desde una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), con tecnología avanzada, en y discutir la importancia de la gestión para minimizar los impactos.

**Metodología:** se analizaron 13 micropoluentes: ibuprofeno (IBP), paracetamol (PCM), atenolol (ATL), Loratadine (LTD), clorhidrato de fexofenadine (FXF), amoxicilina (AMX), 17 $\alpha$ -etilnilo estradiol (EE2), cafeína (CAF), diclofenaco de sodio (DCF), estrona (E1), estriol (E3), bisphenol A (BPA), y ftalato de bis(2-etilhexilo) (DEHP), en muestras de efluentes colectadas en diferentes períodos del día y en diferentes etapas de tratamiento de una PTAR, que incorpora tecnologías avanzadas en su proceso. La presencia de micropoluentes y la cuantificación de los mismos fueron realizadas con el uso de técnicas de LC-MS y GC-MS.

**Originalidad/Relevancia:** Este es el primer estudio realizado en una PTAR en Manaus, una importante ciudad de Brasil, que está localizada en uno de los sistemas fluviales más extensos del mundo. De este modo, los datos obtenidos son importantes para entender el comportamiento de la descarga de micropoluentes en el Río Amazonas e sus implicaciones.

**Principales resultados:** Después del proceso de tratamiento, los micropoluentes paracetamol, clorhidrato de fexofenadine, cafeína, diclofenaco de sodio y ftalato de bis(2-etilhexilo) fueron detectados en el efluente final.

**Contribuciones:** Los resultados obtenidos en este estudio indicaron la necesidad de un manejo integrado que considere enfoque técnico, gubernamental, organizacional y comunitario para minimizar los efectos de la descarga de micropoluentes en el medio ambiente.

**Palabras clave:** micropoluentes; remoción; agua residual; tecnologías; manejo integrado.



## Introdução

O maior e mais extenso sistema fluvial do mundo está localizado na Amazônia e tem um papel importante na manutenção do equilíbrio global da hidrologia e do clima, além de abrigar uma enorme biodiversidade de água doce (Fabregat-Safont et al., 2021; Fassoni-Andrade et al., 2021; Oberdorff et al., 2019). A construção de hidrelétricas, a mineração, o desmatamento, a queima de biomassa e a expansão agrícola são os principais causadores antrópicos de impacto ambiental estudados na bacia amazônica; no entanto, a urbanização também exerce uma pressão significativa sobre esse ecossistema e o tratamento de águas residuais é uma questão relacionada (Fabregat-Safont et al., 2021; Latrubesse et al., 2017; Pasquini et al., 2014; Ruiz-Vásquez et al., 2020). Apenas 13,1% da população da Amazônia brasileira possui sistema público de coleta de esgoto e somente 21,4% desse grupo se beneficia do tratamento de esgoto (SNIS, 2021). Cerca de dois terços das pessoas, na Amazônia, vivem em grandes cidades como Manaus, que é a cidade mais populosa da Amazônia brasileira com uma população estimada em 2.255.903 pessoas (IBGE, 2021).

Além da poluição causada pela matéria orgânica presente nos efluentes não tratados, outros compostos químicos, como micropoluentes, são lançados nos corpos d'água receptores. Micropoluentes são substâncias químicas detectadas em amostras ambientais em concentrações de elemento traço, em µg/L ou menos (Isik et al., 2022). Essas substâncias, também conhecidas como contaminantes emergentes, consistem em diversas substâncias antropogênicas e de origem natural, incluindo produtos de higiene pessoal, desreguladores endócrinos, biocidas e substâncias polifluoralquiladas (Ren et al., 2022). Nas últimas décadas, a ocorrência de micropoluentes no ambiente aquático tornou-se um assunto que tem gerado uma crescente preocupação ambiental. Isso ocorreu porque o efeito dessas substâncias em organismos não-alvo não é bem conhecido, mas os resultados obtidos em estudos prévios mostram que essas substâncias podem ser potencialmente prejudiciais em organismos não-alvo (Carles et al., 2021; Gallego et al., 2021; Li et al., 2016; Ngweme et al., 2021; Yang et al., 2017).

Segundo Ofrydopoulou et al. (2022), as estações de tratamento de efluentes (ETEs) têm sido identificadas como a principal origem de micropoluentes que entram em corpos d'água naturais. Numerosos estudos mostraram que as ETEs convencionais são incapazes de eliminar muitos compostos orgânicos encontrados no efluente, incluindo micropoluentes (Bogunović et al., 2021; Guillossou et al., 2019; Pasquini et al., 2014). Os efluentes gerados pelas ETEs podem ser lançados nos corpos hídricos receptores, sendo que os compostos presentes nos efluentes e/ou seus metabólitos e produtos de transformação são detectados nas águas superficiais ou marinhas, e, conseqüentemente, nas fontes de água para abastecimento humano (Glassmeyer et al., 2017; Rogowska et al., 2020; Undeman et al.,

2022). Esses resultados afetam diretamente as intenções de alcançar um dos Objetivos Globais de Desenvolvimento Sustentável (ODS) criados pelas Nações Unidas, que é o acesso universal e equitativo à água potável segura até 2030 (United Nations, 2015).

O rio Amazonas é uma das fontes de dados sobre micropoluentes na região amazônica. Rico et al. (2021) encontraram mais de 40 compostos químicos diferentes nas águas deste rio: antibióticos, antiarrítmicos, anti-hipertensivos, reguladores lipídicos, antidiabéticos, protetores gastrointestinais, anti-inflamatórios, analgésicos, antidepressivos, antiepilépticos, ansiolíticos e psicoestimulantes. Além de drogas farmacêuticas e, drogas ilegais, outros micropoluentes como cocaína, benzoilecgonina, sucralose, metilparabeno, propilparabeno e benzofenona-3 são encontrados no Rio Amazonas (Fabregat-Safont et al., 2021; Thomas et al., 2014).

Em uma revisão recente sobre remoção de micropoluentes em efluentes, Ribas et al. (2021) discutem os estudos que vêm sendo realizados no Brasil e mostram que os estudos concentram-se em sua maioria na região sudeste do país e foram conduzidos por instituições públicas. Os estudos geralmente estão relacionados a tratamentos convencionais e apenas alguns abordam tratamentos avançados (como processos de oxidação avançada). Segundo os autores, os pesquisadores na Amazônia brasileira não estão realizando estudos sobre a remoção de micropoluentes em ETEs.

O primeiro estudo sobre tratamento de esgoto nessa região foi publicado por Ribas et al. (2022), mas é restrito a ensaios *in vitro*. Considerando a relevância da bacia amazônica, a falta de tratamento de efluentes na região e a ineficiência da remoção de muitos micropoluentes em estações convencionais de tratamento de efluentes, esta pesquisa é inovadora e visa determinar a dinâmica do lançamento de micropoluentes no rio Amazonas a partir de uma ETE avançada, discutindo, também, a importância da gestão para minimizar os impactos ambientais.

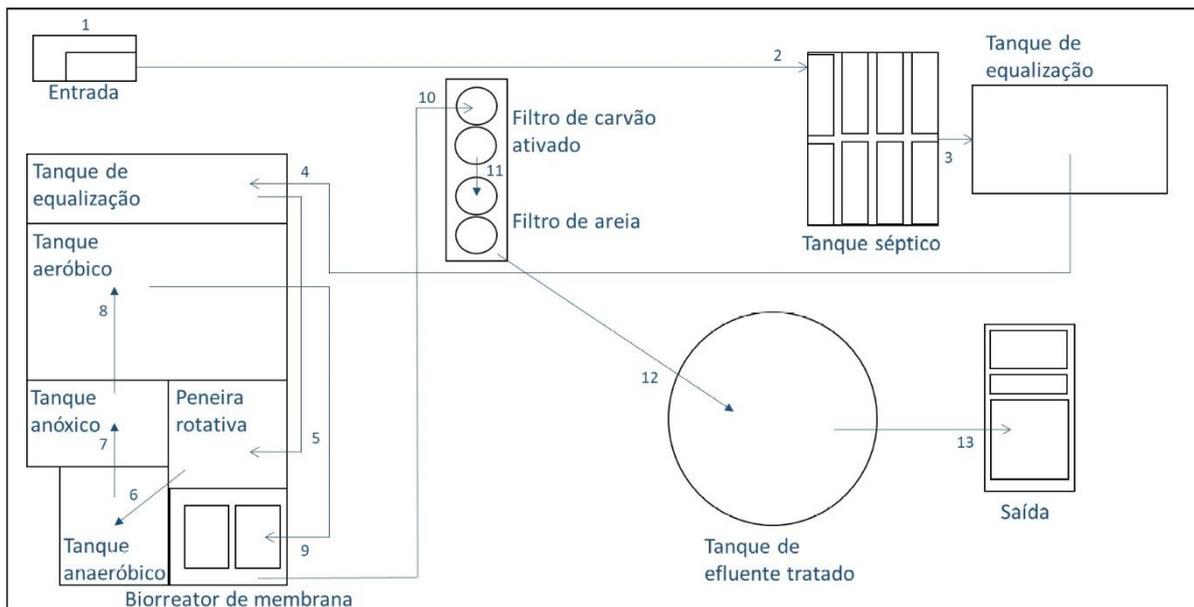
## Materiais e Métodos

### Amostragem

As amostras foram coletadas em cinco campanhas realizadas entre julho e agosto de 2021 em uma ETE destinada ao tratamento de efluentes domésticos, localizada no distrito industrial de Manaus, estado do Amazonas, Brasil. A ETE tem uma capacidade de tratamento de efluentes de 1.140 m<sup>3</sup>/dia e inclui tratamento primário e secundário com tecnologia de lodos ativados e tratamento terciário com tecnologia de biorreator de membrana (MBR), filtro de carvão ativado e filtro de areia. O esquema que detalha o tratamento de efluentes é apresentado na Figura 1. A figura é meramente ilustrativa e não representa a escala real da ETE.

Figura 1

Esquema de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) localizada no distrito industrial de Manaus, estado do Amazonas



O efluente tratado nesta ETE é de origem doméstica, e a Tabela 1 apresenta a caracterização deste efluente durante o período de amostragem. As amostras foram coletadas em três pontos diferentes da ETE: a) na entrada, b) após o tratamento do biorreator de membrana (MBR) e c) na saída, realizada três vezes ao dia (às 9h, 14h e 17h), totalizando 45 amostras. A amostragem foi realizada manualmente em frasco de vidro âmbar (1.000 mL). No laboratório, todas as amostras tiveram o pH ajustado para 5,0 e foram mantidas refrigeradas (4 °C) até o preparo da amostra e posterior análise.

Tabela 1

## Caracterização do efluente na entrada da ETE

<u>Campanha de amostragem</u>	I e II	III, IV e V
Parâmetros	13/07/2021 e 15/07/2021	09/08/2021, 11/08/2021 e 12/08/2021
SST (mg/L)	2.780	1.382
pH	5,57	5
t (°C)	31,3	30,7
P Total (mg/L)	2,12	1,79
N-NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> Total (mg/L)	134,94	100,77
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	27,32	24,78
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	126,32	94,24
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Total (mg/L)	83,14	79,41
DQO (O <sub>2</sub> mg/L)	535,2	513,6
DBO (O <sub>2</sub> mg/L)	294,3	256,8

**Fonte:** Laboratório de Tratamento de Efluentes. Abreviações: SST: sólidos suspensos totais; DQO: demanda química de oxigênio; DBO: demanda bioquímica de oxigênio.

## Informações químicas

Um total de 13 micropoluentes foram escolhidos para o estudo, incluindo: i) compostos farmacêuticos: ibuprofeno (IBP), paracetamol (PCM), atenolol (ATL), loratadina (LTD), cloridrato de fexofenadina (FXF), amoxicilina (AMX), 17 $\alpha$ -etinilestradiol (EE2), cafeína (CAF), diclofenaco sódico (DCF); dois hormônios naturais: estrona (E1); estriol (E3); ii) produtos químicos industriais: bisfenol A (BPA) e bis(2-etilhexil) ftalato (DEHP). A Tabela 2 apresenta mais detalhes sobre os micropoluentes analisados neste estudo. Os ensaios foram realizados por meio de análises CG-EM e CL-EM, abrangendo o maior número possível de técnicas para determinação de possíveis micropoluentes nas amostras.

Tabela 2

## Informações químicas sobre os micropoluentes estudados

Micropoluente	Fórmula empírica	Peso molecular (g/mol)	Número CAS	Fabricante
IBP	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	206,28	15687-27-1	LGC Standards
PCM	CH <sub>3</sub> CONHC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> OH	151,16	103-90-2	European Pharmacopeia Standard
ATL	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	266,34	29122-68-7	Sigma-Aldrich
LTD	C <sub>22</sub> H <sub>23</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Cl	382,88	79794-75-5	European Pharmacopeia Standard
FXF	C <sub>32</sub> H <sub>39</sub> NO <sub>4</sub> .HCl	538,12	153439-40-8	European Pharmacopeia Standard
AMX	C <sub>16</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>5</sub> S.3H <sub>2</sub> O	419,45	61336-70-7	European Pharmacopeia Standard
EE2	C <sub>20</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	296,4	57-63-6	Sigma-Aldrich
CAF	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	194,19	58-08-2	LGC Standards
DCF	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> Cl <sub>2</sub> NNaO <sub>2</sub>	318,13	15307-79-6	Sigma-Aldrich
E1	C <sub>18</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	270,37	53-16-7	LGC Standards
E3	C <sub>18</sub> H <sub>24</sub> O <sub>3</sub>	288,38	50-27-1	LGC Standards
BPA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> OH) <sub>2</sub>	228,29	80-05-7	Sigma-Aldrich
DEHP	C <sub>24</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	390,56	117-81-7	Sigma-Aldrich

### Análises em CG-EM

Todas as amostras, sejam elas da entrada, da MBR ou da saída, receberam o mesmo tratamento. Primeiro, 250 mL de cada amostra foram filtrados através de um microfiltro de fibra de vidro (GF-3, retenção de partículas < 0,6 µm, Macherey-Nagel, Alemanha) para evitar o entupimento do cartucho de extração em fase sólida (SPE). Em seguida, as amostras foram acidificadas com HCl (pH = 2) e concentradas em um cartucho DSC-18 SPE (Supelco) em um sistema vacuum manifold (Supelco). Depois disto, procedimentos de extração e derivatização em fase sólida foram aplicados, conforme relatado anteriormente por Pessoa et al. (2012). Por fim, as amostras foram eluídas com 4 mL de solução 50:50 (v/v) de acetona e metanol. Para a evaporação do solvente, o eluato foi mantido em estufa a 60 °C. Todos os eluatos foram derivatizados com 150 µL de N,O-bis(trimetilsilil)trifluoroacetamida (BSTFA – Sigma-Aldrich) a 60 °C por 30 minutos.

As amostras foram analisadas por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas, CG-EM (Shimadzu, QP 2020). Os parâmetros foram utilizados de acordo com a metodologia apresentada por Ribas et al. (2022) e estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3**

*Parâmetros usados na cromatografia gasosa*

Parâmetros de CG	Descrição
Coluna CG	RXI-5 MS coluna capilar
Dimensões da coluna	30 m x 0.25 mm Restek
Espessura do filme	0.25 µm
Gás de arraste	Hélio
Temperatura de entrada	290 °C
Modo de entrada	Splitless
Temperatura inicial do forno	100 °C
Temperatura da fonte de íons	200 °C
Linha de transferência do detector de massa seletiva	290 °C
Corte de solvente	10 min
Volume de injeção	1 µL
Fluxo constante	1.43 mL/min
Rampa de temperatura do forno	100 °C (5 min) 20 °C/min at 150 °C (1 min) 20 °C/min at 250 °C (0 min) 20 °C/min at 290 °C (4 min) 10 °C/min at 320 °C (5 min)
Modo de aquisição	SIM
Método de ionização	IE

Todos os parâmetros analíticos aplicados aos compostos que puderam ser quantificados com CG-EM são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4

*Parâmetros analíticos aplicados na quantificação de micropoluentes usando CG-EM*

Micropolvente	Tempo de retenção (min)	Íon alvo (m/z)	Íon referencia (m/z)	Faixa de calibração (mg L <sup>-1</sup> )
Ibuprofeno (IBP)	11,567	160	263	0,25-10
Paracetamol (PCM)	11,653	206	280	0,25-5
Cafeína (CAF)	13,242	194	109	0,25-10
Bisfenol A (BPA)	15,175	357	358	0,25-2,5
Diclofenaco de sódio (DCF)	15,683	214	242	0,25-10
Bis(2-etilhexil) ftalato (DEHP)	16,825	149	167	0,25-2,5
Estrona (E1)	17,733	342	257	0,25-10
17 $\alpha$ -etinilestradiol (EE2)	18,950	425	285	0,25-20
Estriol (E3)	19,775	504	297	0,25-20
Loratadina (LTD)	22,200	382	266	0,25-10

#### *Análises em CL-EM*

Para realizar a identificação de micropoluentes usando CL-EM, 250 mL de cada amostra (entrada, MBR e saída) foram filtrados através de um microfiltro de fibra de vidro (GF-3, retenção de partículas < 0,6  $\mu$ m, Macherey-Nagel, Alemanha). Inicialmente, as amostras foram acidificadas com HCl (pH = 2) e concentradas em cartucho (Oasis HLB 6cc 500 mg) em sistema de vacuum manifold (Supelco). As amostras foram eluídas com 8 mL de solução de 50:50 (v/v) acetonitrila e metanol. O solvente foi, então, removido sob N<sub>2</sub>. A amostra foi reconstituída em 1 mL de metanol e armazenada a 4°C até a análise de UHPLC.

A análise instrumental foi realizada utilizando um sistema UHPLC (Dionex Ultimate 3000 UHPLC, Dionex Corporation Sunnyvale, EUA), acoplado a um espectrômetro de massas de alta resolução equipado com um injetor automático (LC TriPlus RSH, Thermo Scientific). Foram utilizados os parâmetros da metodologia de Ribas et al. (2022), que são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5**

*Parâmetros usados na cromatografia líquida*

<b>Parâmetros de CL</b>	<b>Descrição</b>
Coluna CL	Coluna Synchronis C18
Dimensões da coluna	2,1 x 50 mm Thermo Fisher Scientific
Fase móvel A	Água acidificada (0,1% de ácido fórmico) e formiato de amônio (5mM)
Fase móvel B	Metanol acidificado (ácido fórmico)
	1% do eluentet B
Gradiente de eluição	100% do eluente (7 min)
	100% do eluente (1 min)
	5% do eluente (1 min)
Vazão da fase mpoovel	0.4 mL/min
Volume de injeção	10 µL
Temperatura da coluna	40 °C
Aquecedor ESI	380 °C
Modo de íons	Positivo
Faixa de massas	150-600 amu

A Tabela 6 mostra todos os parâmetros analíticos aplicados a oito compostos quantificados usando CL-EM.

**Tabela 6**

*Parâmetros analíticos aplicados na quantificação de micropoluentes usando CL-EM*

<b>Micropollutant</b>	<b>Retention Time (min)</b>	<b>Target ion (m/z)</b>	<b>Calibration range (µg L<sup>-1</sup>)</b>
Atenolol (ATL)	0.35	152.00	5-1,500
Paracetamol (PCM)	1.90	195.00	5-1,500
Caffeine (CAF)	3.90	267.17	5-400
Cloridrato de fexofenadina (FXF)	6.02	502.00	5-2,000
Amoxicilina (AMX)	4.45	332.00	5-1,500
Diclofenaco de sódio (DCF)	7.43	366.00	15-2,000
Loratadina (LTD)	7.67	383.00	5-1,500
Bis(2-etilhexil) ftalato (DEHP)	9.86	391.00	5-1,500

### **Tratamento convencional versus tratamento avançado: a diferença na remoção de micropoluentes**

O tratamento secundário de efluentes, utilizado para remover a matéria orgânica por biodegradação, também é conhecido como tratamento convencional de efluentes. No Brasil, os processos de tratamento mais comuns aplicados em ETEs são o reator anaeróbio combinado com lagoa facultativa, o reator UASB e o lodo ativado (Von Sperling, 2016). No entanto, esses processos são muitas vezes ineficientes na remoção de micropoluentes em efluentes. Estudando diferentes ETEs, Lin et al. (2009) observaram que muitos antibióticos (eritromicina-H<sub>2</sub>O, ampicilina, metronidazol e lincomicina, entre outros), vasodilatadores

(pentoxileína) e reguladores lipídicos (ácido clofíbico, genfibrozil, bezafibrato e pravastatina) não foram removidos pelo processo de lodo ativado. Além disso, a remoção de hormônios foi incompleta quando os reatores UASB foram usados no tratamento de efluentes. Os resultados obtidos por Vassalle et al. (2020) mostram que a remoção de etinilestradiol gira em torno de 25% e a eficiência da remoção de estradiol é de 84,9% quando se utiliza um reator UASB. A dificuldade em conseguir a completa remoção dos hormônios presentes nos efluentes também é apresentada em Louros et al. (2021), que, ao utilizar um UASB em operação contínua, obteve eficiência de remoção de 49% para estrona e de 39% para etinilestradiol.

Também são encontrados outros problemas relacionados com a concentração de micropoluentes nos efluentes descartados após o tratamento. Mesmo com alta eficiência de remoção em ETEs, a concentração final de alguns micropoluentes, como triclosan e estrogênios, pode ser maior do que a sua concentração sem efeito previsto (PNEC, do inglês *predicted no-effect concentration*), representando um risco para os organismos aquáticos (Komolafe et al., 2021). Além disso, em alguns casos, o processo biológico pode aumentar a concentração de micropoluentes no efluente tratado em comparação com o efluente bruto devido à desconjugação dos conjugados por biotransformação. Pessoa et al. (2014) mostraram que as concentrações de estrona na entrada da ETE eram cinco vezes maiores que as de  $\beta$ -estradiol. A estrona foi mais frequentemente detectada em efluentes sem tratamento devido à degradação parcial de  $\beta$ -estradiol em estrona e à desconjugação de compostos conjugados de estrona (estrona sulfonida ou glicuronida) em sistemas de tratamento de efluente. O mesmo cenário foi encontrado em águas residuais tratadas para produtos farmacêuticos, como carbamazepina (eficiência de remoção -76%, - 89%), ácido nalidíxico (eficiência de remoção -5%, -96%) e nevirapina (eficiência de remoção -7%, - 88%), em lagoas de estabilização de efluentes (K'oreje et al., 2018)

No Brasil, a ocorrência ambiental de micropoluentes é pouco estudada e os compostos micropoluentes não fazem parte das diretrizes nacionais de qualidade da água (Quadra et al., 2021). Como esperado, as estações de tratamento de efluentes urbanos e industriais no Brasil não planejam a remoção de micropoluentes e seus projetos e estudos sobre as diferentes tecnologias de remoção dos mesmos são poucos. Em publicação recente, Ribas et al. (2021) apresentou uma lista de estudos que foram realizados no Brasil sobre tecnologias de remoção de micropoluentes nos últimos 20 anos. Nesta revisão, observou-se que, embora técnicas mais avançadas (processos oxidativos avançados, por exemplo) sejam conhecidas, no Brasil, os estudos visam apenas adaptar as técnicas mais utilizadas no tratamento convencional a fim de verificar sua eficácia na remoção de micropoluentes. O tratamento biológico é o mais estudado, com uso de reator UASB somente ou em combinação com outros processos, seguido de fotodegradação, lodo ativado e, também, tratamento via macrófitas.

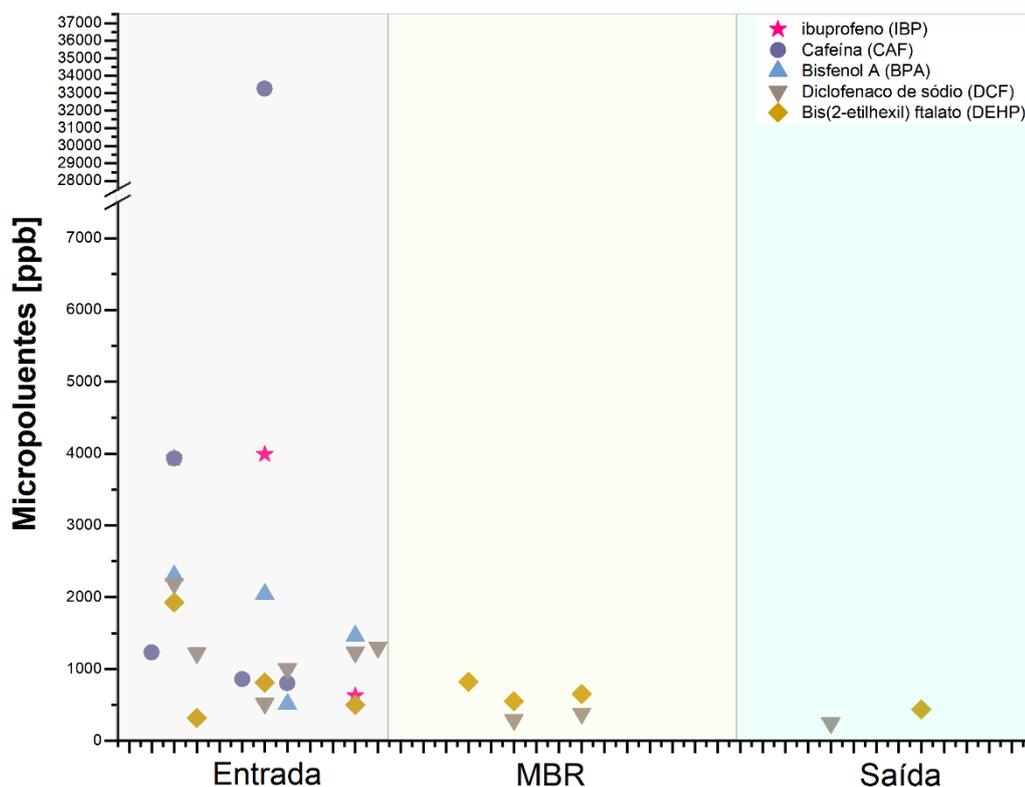
A ETE analisada neste estudo apresenta técnicas avançadas, como o tratamento

terciário, que não é comum na maioria das ETEs urbanas, e pode contribuir para a remoção de micropoluentes. Todos os compostos estudados tiveram parâmetros analíticos determinados por CG-EM, CL-EM ou por ambos; no entanto, nem todos os compostos foram quantificados nas amostras analisadas. Os compostos ATL, LTD, EE2, E1 e E3 não foram identificados ou quantificados em nenhuma das amostras analisadas. CAF, DCF e DEHP foram identificados e quantificados usando ambas as técnicas cromatográficas. IBP e BPA foram identificados e quantificados por CG-EM e PCM, FFX e AMX por CL-EM.

Considerando o processo de tratamento utilizado na ETE, observou-se que a concentração de micropoluentes é maior na entrada e diminui após o tratamento. Os resultados são apresentados nos gráficos criados no Origin PRO 2021 (Figura 2, Figura 3).

**Figura 2**

*Determinação de micropoluentes em uma ETE usando CG-EM*



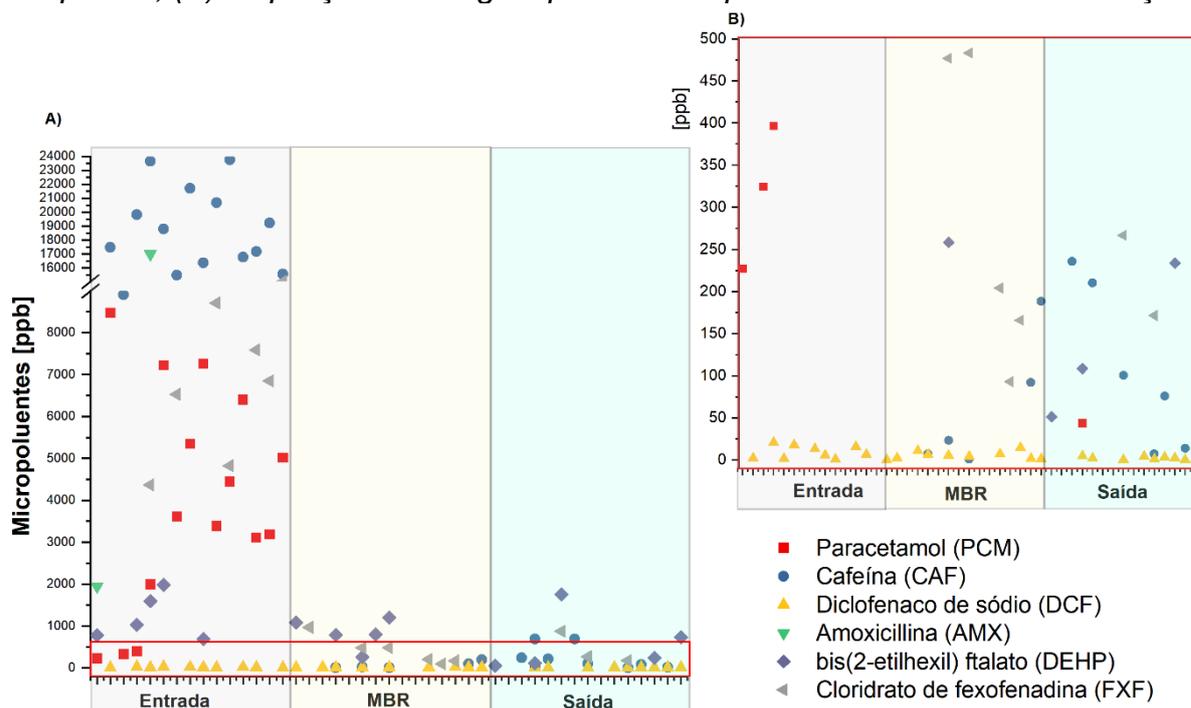
De acordo com os resultados do CG-EM (Figura 2), IBP, CAF e BPA foram completamente removidos durante o processo de tratamento e a concentração de DCF e DEHP foi reduzida após o tratamento com MBR (73% e 24%, respectivamente) até o ponto de saída (80% e 51%, respectivamente).

Usando CL-EM, o mesmo comportamento foi observado (Figura 3); entretanto, como a sensibilidade da técnica é maior, menores concentrações puderam ser detectadas. A

concentração de micropoluentes diminui após o tratamento. Considerando o limite de detecção, o AMX foi completamente removido durante o processo de tratamento e as concentrações de PCM, CAF, DCF, DEHP e FFX reduziram após o tratamento com MBR até o ponto de saída (99%, 99%, 72%, 53% e 64%, respectivamente).

**Figura 3**

*Determinação de micropoluentes em uma ETE usando CL-EM; (A) todos os compostos; (B) ampliação da imagem para os compostos com menor concentração*



A técnica de biorreator de membrana (MBR) é uma alternativa promissora ao tratamento convencional e seu uso está aumentando para tratamento e reuso de efluentes municipais. No entanto, grandes preocupações foram levantadas em relação à remoção de alguns micropoluentes encontrados em ambientes aquáticos na última década, especialmente dos produtos farmacêuticos que são feitos usando técnicas de microfiltração, ultrafiltração ou nanofiltração (Mert et al., 2018; Zaviska et al., 2013). Phan et al. (2015) observaram uma remoção estável (> 90%) de micropoluentes como CAF e IBP no sistema MBR. Esses compostos são hidrofílicos e, portanto, a biodegradação é o principal mecanismo de remoção durante os processos de tratamento biológico (Alvarino et al., 2017; Phan et al., 2015). A remoção de paracetamol (acetaminofeno) por sistemas MBR baseia-se na sua degradação/transformação, uma vez que não foi detectada presença em sorção em lodo ativado ou no efluente final quando se detectou 100% de remoção (Kim et al., 2014). A combinação de tratamentos de lodo ativado e MBR também é eficiente para remover mais de



70% de AMX em efluentes (Le et al., 2018).

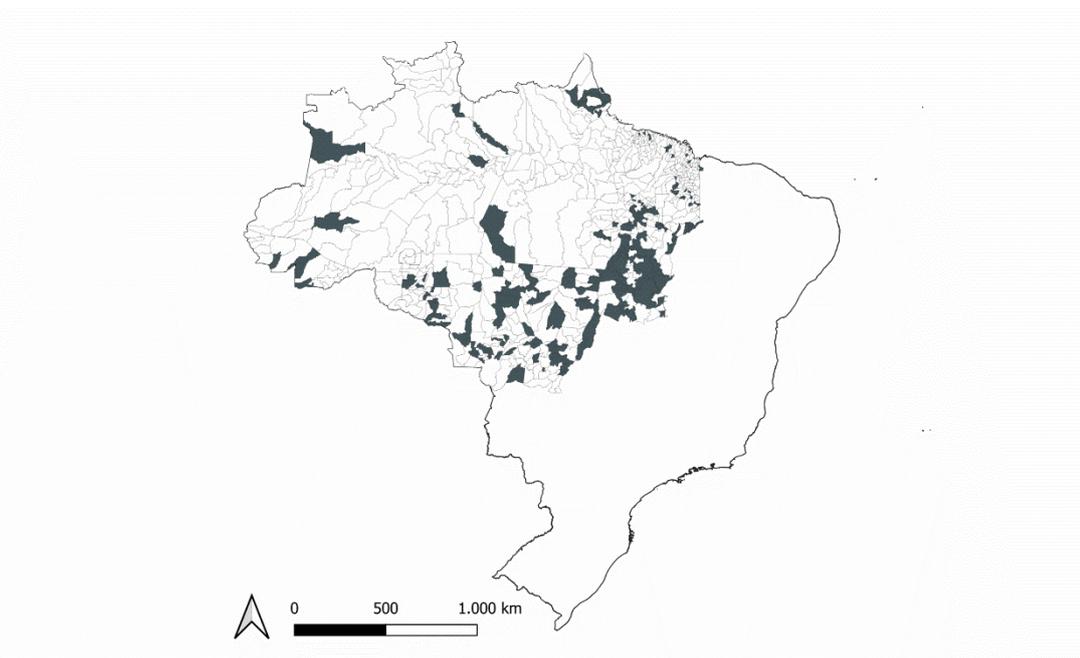
A eficácia do sistema MBR na remoção de BPA (mais de 94%) também foi confirmada por Fudala-Ksiazek et al. (2018). O DCF é uma substância recalcitrante e esse comportamento justifica a menor eficiência de sua remoção em sistemas MBR (Abegglen et al., 2009; Alvarino et al., 2017; Phan et al., 2015). O DEHP tem propriedades químicas estáveis e é difícil de ser degradado no meio ambiente. De acordo com Zhang et al. (2021), apenas 15% da concentração inicial de DEHP foi removida em um sistema MBR. A remoção de FXF é considerada baixa no sistema MBR estudado. Resultados semelhantes foram relatados por (Henning et al., 2019), com 41% de remoção. Segundo os autores, isso ocorre porque o FXF é removido mais rapidamente quando em contato com carreadores (biofiltros) em comparação com o lodo suspenso utilizado nos sistemas MBR.

A utilização do sistema MBR para aumentar a remoção de micropoluentes em adição ao lodo ativado convencional é uma alternativa viável e apresenta bons resultados (Goswami et al., 2018). Para aumentar a faixa de remoção, outras tecnologias podem ser integradas na ETE, por exemplo, um sistema MBR com filtro de carvão ativado, que gera melhores resultados para os parâmetros monitorados durante o tratamento (Alighardashi et al., 2017). Adsorção (ou biossorção) pode ser um dos métodos mais eficazes para remover micropoluentes orgânicos de efluentes aquosos (García-Mateos et al., 2015). A vantagem deste método é a possibilidade de adsorver seletivamente substâncias-alvo de misturas multicomponentes, além de atingir um alto grau de purificação, principalmente de efluentes com baixa concentração de poluentes por meio de um método simples e de baixo custo (Sekulic et al., 2019; Tatarchuk et al., 2019).

Como a ETE estudada atende a uma população de aproximadamente 6.000 pessoas, os resultados obtidos podem ser semelhantes ao que encontraríamos em pelo menos 254 municípios da Amazônia brasileira que possuem menos de 10.000 habitantes (33%). Assim, podemos esperar que os mesmos micropoluentes sejam encontrados nestas estações municipais de tratamento de efluentes e, portanto, nosso estudo poderá ser aplicado como modelo para o desenvolvimento de políticas ambientais, não apenas na empresa onde foi realizado, mas também em municípios com população semelhante (Figura 4).

#### Figura 4

*Municípios da Amazônia brasileira que possuem menos de 10.000 habitantes*



Considerando a situação do tratamento de efluentes no Brasil, os resultados apresentados neste estudo mostraram a importância de avaliar a contribuição de uma estação de tratamento de efluentes no que diz respeito ao lançamento de micropoluentes no rio Amazonas. Assim, a análise das amostras de efluentes evidenciou que, embora tecnologias avançadas de tratamento contribuam removendo ou reduzindo a concentração de micropoluentes, na maioria das vezes, sem uma estratégia de gerenciamento planejada, o meio ambiente permanece sendo afetado por essas substâncias. Conseqüentemente, se considerarmos que o volume de efluentes tratados em Manaus e outras cidades do Brasil é muito baixo e que existem poucas unidades de ETE com capacidade de tratamento avançado, o impacto ambiental certamente é considerável.

#### **A importância do gerenciamento de micropoluentes para redução dos impactos provocados pelo seu descarte**

Como observado, na maioria dos casos as ETEs ao redor do mundo não são capazes de remover micropoluentes durante o tratamento de efluentes e, quando há tratamento, mesmo combinando diferentes processos avançados, não há remoção total dos micropoluentes ou, às vezes, há apenas remoção de uma pequena parcela deles (Kümmerer et al., 2019). Além disso, considerando que muitos países, como o Brasil, não possuem políticas públicas para regulamentar o descarte de micropoluentes em ambientes aquáticos, a presença dessas substâncias na água é uma preocupação para a saúde pública e para o



meio ambiente. Porém, devido ao grande número de substâncias, fontes e vias de entrada nos ambientes aquáticos, desenvolver uma política de resposta pertinente é uma tarefa complexa.

Dessa forma, possíveis respostas políticas para a questão dos micropoluentes aquáticos compreendem três tipos: medidas direcionadas à fonte, abordagens *end-of-pipe* (preventivas) e estratégias de controle (Barcellos et al., 2021; Metz et al., 2019). As soluções direcionadas à fonte visam a redução da entrada de micropoluentes nos corpos d'água por meio da educação e treinamento dos produtores para reduzir a produção de itens que utilizam substâncias tóxicas e da educação dos consumidores para que mudem seu comportamento em relação aos produtos que contêm essas substâncias. As soluções *end-of-pipe*, por sua vez, visam a remoção de micropoluentes dos efluentes, principalmente através da melhoria da tecnologia presentes nas ETEs. As abordagens de controle são, por fim, estratégias preliminares e incluem o monitoramento do nível de poluição para posterior intervenção política (Tosun et al., 2020).

Apesar da falta de gestão governamental, algumas ações baseadas nessas políticas podem ser aplicadas e, principalmente, induzidas por organizações e comunidades, como empresas privadas e municípios que pretendem implantar ETEs a fim de minimizar o impacto do lançamento de micropoluentes em ambientes aquáticos (Barcellos et al., 2021). A simples opção pela implantação de um MBR ao invés do tratamento convencional já é um passo no sentido de gerenciar o lançamento de micropoluentes no meio ambiente e a evolução dessa técnica de tratamento permitirá cada vez mais sustentabilidade em relação aos custos de capital e operação, eficiência operacional, estabilidade, economia e recuperação de recursos (Xiao et al., 2019).

Barcellos et al. (2021) apresentaram outras estratégias para o gerenciamento de micropoluentes que poderiam ser exploradas em países em desenvolvimento como o Brasil. Essas estratégias abrangem abordagens técnicas, governamentais, organizacionais e de base comunitária, como: redução do consumo de micropoluentes, programas educativos em todos os níveis de ensino para o descarte adequado e uso correto de medicamentos, boas práticas organizacionais, estudos avaliativos sobre tecnologias e reconfiguração de ETEs. Portanto, a implantação de sistemas integrados de gestão é uma forma de transformar o descarte de micropoluentes em algo menos dependente de pesados investimentos em soluções tecnológicas incorporadas por bases materiais e mais dependente de tecnologias sociais, iniciativas e convergência de interesses em redes formadas por múltiplos envolvidos na cadeia produtiva.

## O papel do governo na gestão dos micropoluentes e os Objetivos Globais de Desenvolvimento Sustentável

Segundo Aragão et al. (2020), não existe um padrão internacional que determine como lidar com a questão dos micropoluentes e cada país adota a política pública que melhor se adequa à sua realidade. O Brasil, apesar de possuir algumas legislações que tocam neste tema, ainda carece de políticas públicas efetivas e conscientização das partes interessadas. Considerando a importância do tratamento de efluentes para reduzir o impacto ambiental causado por micropoluentes, um programa de monitoramento pode ser o primeiro passo para a definição de políticas públicas em países sem regulamentação para o problema.

Nosso estudo mostra que os micropoluentes estão presentes no efluente doméstico e que o processo de tratamento avançado pode ser uma alternativa para reduzir o impacto do descarte dos micropoluentes na bacia hidrográfica. Esses dados são importantes para a definição de políticas públicas, mas pode ser necessário um amplo monitoramento para auxiliar a tomada de decisões por parte governamental, conforme sugerido por (Wang et al., 2018).

Após 10 anos de amplo monitoramento de micropoluentes no meio ambiente, Mutzner et al. (2022) mostraram que, por meio dessas estratégias, é possível: (i) identificar as fontes de micropoluentes em áreas urbanas; (ii) avaliar sua ameaça ao ambiente aquático; (iii) quantificar as cargas de micropoluentes de áreas urbanas lançadas em escala de captação/cidade/bacia hidrográfica; (iv) avaliar o desempenho das estratégias de controle de poluição e (v) emitir licenças de descarga pelas autoridades locais. Trabalhando a partir desses pontos de vista, os responsáveis no governo estarão contribuindo para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (United Nations, 2015).

Ao reduzir a descarga de micropoluentes, podemos contribuir para dar às pessoas acesso à água potável e melhorar os processos de saneamento utilizados pelos municípios e indústrias por meio de tecnologias avançadas de tratamento. Assim, podemos considerar o ODS 6 como a principal meta neste processo. No entanto, para alcançar a qualidade de água desejada, o tratamento realizado nos efluentes afeta direta e indiretamente todos os outros ODS (Figura 5). O ODS 6 tem sido considerado diretamente relacionado a todos os ODS que envolvem o consumo de água e indiretamente relacionado aos ODS que não envolvem o consumo de água, embora tenham algum papel no seu processo (como educação de qualidade – ODS 4).

Figura 5

Relação do ODS 6 com os demais ODS



### Conclusão

Este estudo procurou entender a dinâmica da descarga de micropoluentes na Amazônia avaliando a contribuição de uma estação de tratamento de efluentes avançada localizada no distrito industrial de Manaus, a cidade mais populosa da Amazônia brasileira. Esta ETE possui um sistema de tratamento secundário com MBR, filtro de carvão ativado e filtro de areia. As concentrações dos 13 micropoluentes testadas em diferentes etapas do tratamento de efluentes mostraram que, mesmo em uma ETE com avançado sistema de tratamento, muitos micropoluentes podem persistir no efluente final em concentrações muito baixas. Este fato demonstra que o controle da descarga de micropoluentes não pode depender apenas das questões técnicas envolvidas no tratamento. A gestão integrada envolvendo abordagens técnicas, governamentais, organizacionais e comunitárias parece ser uma estratégia mais significativa para reduzir a descarga de micropoluentes por meio de ações de monitoramento, substituição e uso consciente de micropoluentes.

O estudo aqui publicado é apenas o primeiro trabalho sobre a presença de



micropoluentes em uma ETE na Amazônia e possui limitações técnicas, como seus métodos de amostragem e análise. Portanto, não pode ser considerado um monitoramento completo da presença de micropoluentes em uma ETE. Assim, sugere-se a realização de estudos complementares com maior período de monitoramento, inclusive das bacias hidrográficas, e determinação da correlação entre a concentração de micropoluentes no rio e na ETE. Assim, novos estudos podem contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas sobre o tema que auxiliem no cumprimento do ODS 6 pelo Brasil e outros ODS correlatos.

Sendo o rio Amazonas a principal fonte de abastecimento de água, alimentação, transporte e renda das comunidades ribeirinhas, garantir a qualidade de suas águas é fundamental para a manutenção da biodiversidade, da saúde humana e do meio ambiente da região. Assim, considerando este estudo como um primeiro alerta e aprofundando o conhecimento com estudos futuros, aqueles com poder de tomar decisões poderão intervir na forma como os efluentes são tratados e garantir a remoção de micropoluentes para níveis seguros.

**Fontes de financiamento:** Este trabalho é resultado de um Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento realizado pela Equipe de Desenvolvimento Ambiental da Samsung Eletrônica da Amazônia com recursos da Lei Federal nº 8.387/1991, de acordo com o art. 21 do Decreto N° 10.521/2020.

### Referências

- Abegglen, C., Joss, A., McArdell, C. S., Fink, G., Schlüsener, M. P., Ternes, T. A., & Siegrist, H. (2009). The fate of selected micropollutants in a single-house MBR. *Water Research*, 43(7), 2036–2046. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.005>
- Alighardashi, A., Pakan, M., Jamshidi, S., & Shariati, F. P. (2017). Performance evaluation of membrane bioreactor (MBR) coupled with activated carbon on tannery wastewater treatment. *Membrane Water Treatment*, 8(6), 517–528. <https://doi.org/10.12989/mwt.2017.8.6.517>
- Alvarino, T., Torregrosa, N., Omil, F., Lema, J. M., & Suarez, S. (2017). Assessing the feasibility of two hybrid MBR systems using PAC for removing macro and



micropollutants. *Journal of Environmental Management*, 203, 831–837.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.023>

Aragão, R. B. de A., Semensatto, D., Calixto, L. A., & Labuto, G. (2020). Pharmaceutical market, environmental public policies and water quality: the case of the São Paulo Metropolitan Region, Brazil. *Cadernos de Saúde Pública*, 36(11).

<https://doi.org/10.1590/0102-311x00192319>

Barcellos, D. da S., Procopiuck, M., & Bollmann, H. A. (2021). Management of pharmaceutical micropollutants discharged in urban waters: 30 years of systematic review looking at opportunities for developing countries. *Science of The Total Environment*, 151128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151128>

Bogunović, M., Ivančev-Tumbas, I., Česen, M., Sekulić, T. D., Prodanović, J., Tubić, A., Heath, D., & Heath, E. (2021). Removal of selected emerging micropollutants from wastewater treatment plant effluent by advanced non-oxidative treatment - A lab-scale case study from Serbia. *Science of the Total Environment*, 765.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142764>

Carles, L., Wullschleger, S., Joss, A., Eggen, R. I. L., Schirmer, K., Schuwirth, N., Stamm, C., & Tlili, A. (2021). Impact of wastewater on the microbial diversity of periphyton and its tolerance to micropollutants in an engineered flow-through channel system. *Water Research*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117486>

Fabregat-Safont, D., Ibáñez, M., Bijlsma, L., Hernández, F., Waichman, A. V., de Oliveira, R., & Rico, A. (2021). Wide-scope screening of pharmaceuticals, illicit drugs and their metabolites in the Amazon River. *Water Research*, 200.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117251>



Fassoni-Andrade, A. C., Fleischmann, A. S., Papa, F., Paiva, R. C. D. de, Wongchuig, S., Melack, J. M., Moreira, A. A., Paris, A., Ruhoff, A., Barbosa, C., Maciel, D. A., Novo, E., Durand, F., Frappart, F., Aires, F., Abrahão, G. M., Ferreira-Ferreira, J., Espinoza, J. C., Laipelt, L., ... Pellet, V. (2021). Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. *Reviews of Geophysics*, 59(4).

<https://doi.org/10.1029/2020RG000728>

Fudala-Ksiazek, S., Pierpaoli, M., & Luczkiewicz, A. (2018). Efficiency of landfill leachate treatment in a MBR/UF system combined with NF, with a special focus on phthalates and bisphenol A removal. *Waste Management*, 78, 94–103.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.012>

Gallego, S., Montemurro, N., Béguet, J., Rouard, N., Philippot, L., Pérez, S., & Martin-Laurent, F. (2021). Ecotoxicological risk assessment of wastewater irrigation on soil microorganisms: Fate and impact of wastewater-borne micropollutants in lettuce-soil system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 223.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112595>

García-Mateos, F. J., Ruiz-Rosas, R., Marqués, M. D., Cotoruelo, L. M., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero, T. (2015). Removal of paracetamol on biomass-derived activated carbon: Modeling the fixed bed breakthrough curves using batch adsorption experiments. *Chemical Engineering Journal*, 279, 18–30.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.144>

Glassmeyer, S. T., Furlong, E. T., Kolpin, D. W., Batt, A. L., Benson, R., Boone, J. S., Conerly, O., Donohue, M. J., King, D. N., Kostich, M. S., Mash, H. E., Pfaller, S. L., Schenck, K. M., Simmons, J. E., Varughese, E. A., Vesper, S. J., Villegas, E. N., & Wilson, 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*, 581–582, 909–922.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.004>

Goswami, L., Vinoth Kumar, R., Borah, S. N., Arul Manikandan, N., Pakshirajan, K., & Pugazhenth, G. (2018). Membrane bioreactor and integrated membrane bioreactor systems for micropollutant removal from wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.024>

Guillossou, R., Le Roux, J., Mailler, R., Vulliet, E., Morlay, C., Nauleau, F., Gasperi, J., & Rocher, V. (2019). Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: What are the benefits of an advanced treatment by activated carbon adsorption in comparison to conventional treatment? *Chemosphere*, 218, 1050–1060.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.182>

Henning, N., Falås, P., Castronovo, S., Jewell, K. S., Bester, K., Ternes, T. A., & Wick, A. (2019). Biological transformation of fexofenadine and sitagliptin by carrier-attached biomass and suspended sludge from a hybrid moving bed biofilm reactor. *Water Research*, 167, 115034. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115034>

IBGE. (2021). *Estimativas da população : 2021 : nota metodológica n. 01 : estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros, com data de referência em 1º de julho de 2021.*

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101849.pdf>

Isik, O., Erbil, M. C., Abdelrahman, A. M., Ersahin, M. E., Koyuncu, I., Ozgun, H., & Demir, I. (2022). Removal of micropollutants from municipal wastewater by membrane bioreactors: Conventional membrane versus dynamic membrane. *Journal of*



*Environmental Management*, 303, 114233.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114233>

K'oreje, K. O., Kandie, F. J., Vergeynst, L., Abira, M. A., Van Langenhove, H., Okoth, M., & Demeestere, K. (2018). Occurrence, fate and removal of pharmaceuticals, personal care products and pesticides in wastewater stabilization ponds and receiving rivers in the Nzoia Basin, Kenya. *Science of the Total Environment*, 637–638, 336–348.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.331>

Kim, M., Guerra, P., Shah, A., Parsa, M., Alaei, M., & Smyth, S. A. (2014). Removal of pharmaceuticals and personal care products in a membrane bioreactor wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 69(11), 2221–2229.

<https://doi.org/10.2166/wst.2014.145>

Komolafe, O., Mrozik, W., Dolfing, J., Acharya, K., Vassalle, L., Mota, C. R., & Davenport, R. (2021). Occurrence and removal of micropollutants in full-scale aerobic, anaerobic and facultative wastewater treatment plants in Brazil. *Journal of Environmental Management*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112286>

Kümmerer, K., Dionysiou, D. D., Olsson, O., & Fatta-Kassinos, D. (2019). Reducing aquatic micropollutants – Increasing the focus on input prevention and integrated emission management. *Science of The Total Environment*, 652, 836–850.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.219>

Latrubesse, E. M., Arima, E. Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V. R., D'Horta, F. M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P. A., Ribas, C. C., Norgaard, R. B., Filizola, N., Ansar, A., Flyvbjerg, B., & Stevaux, J. C. (2017). Damming the rivers of the Amazon

basin. In *Nature* (Vol. 546, Issue 7658, pp. 363–369).

<https://doi.org/10.1038/nature22333>

Le, T.-H., Ng, C., Tran, N. H., Chen, H., & Gin, K. Y.-H. (2018). Removal of antibiotic residues, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes in municipal wastewater by membrane bioreactor systems. *Water Research*, 145, 498–508.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.060>

Li, X., Shang, X., Luo, T., Du, X., Wang, Y., Xie, Q., Matsuura, N., Chen, J., & Kadokami, K. (2016). Screening and health risk of organic micropollutants in rural groundwater of Liaodong Peninsula, China. *Environmental Pollution*, 218, 739–748.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.070>

Lin, A. Y. C., Yu, T. H., & Lateef, S. K. (2009). Removal of pharmaceuticals in secondary wastewater treatment processes in Taiwan. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1–3), 1163–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.108>

Louros, V. L., Lima, D. L. D., Leitão, J. H., Esteves, V. I., & Nadais, H. G. A. (2021). Impact of UASB reactors operation mode on the removal of estrone and 17 $\alpha$ -ethinylestradiol from wastewaters. *Science of the Total Environment*, 764.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144291>

Malm, O. (1998). Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon.

*Environmental Research*, 77(2), 73–78. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9600798/>

Mert, B. K., Ozengin, N., Dogan, E. C., & Aydiner, C. (2018). Efficient Removal Approach of Micropollutants in Wastewater Using Membrane Bioreactor. In *Wastewater and Water Quality*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75183>



Metz, F., Leifeld, P., & Ingold, K. (2019). Interdependent policy instrument preferences: a two-mode network approach. *Journal of Public Policy*, 39(4), 609–636.

<https://doi.org/10.1017/S0143814X18000181>

Mutzner, L., Furrer, V., Castebrunet, H., Dittmer, U., Fuchs, S., Gernjak, W., Gromaire, M.-C., Matzinger, A., Mikkelsen, P. S., Selbig, W. R., & Vezzaro, L. (2022). A decade of monitoring micropollutants in urban wet-weather flows: What did we learn? *Water Research*, 223, 118968. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118968>

Ngweme, G. N., Al Salah, D. M. M., Laffite, A., Sivalingam, P., Grandjean, D., Konde, J. N., Mulaji, C. K., Breider, F., & Poté, J. (2021). Occurrence of organic micropollutants and human health risk assessment based on consumption of *Amaranthus viridis*, Kinshasa in the Democratic Republic of the Congo. *Science of the Total Environment*, 754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142175>

Oberdorff, T., Dias, M. S., Jézéquel, C., Albert, J. S., Arantes, C. C., Bigorne, R., Carvajal-Valleros, F. M., De Wever, A., Frederico, R. G., Hidalgo, M., Hugueny, B., Leprieur, F., Maldonado, M., Maldonado-Ocampo, J., Martens, K., Ortega, H., Sarmiento, J., Tedesco, P. A., Torrente-Vilara, G., ... Zuanon, J. (2019). Unexpected fish diversity gradients in the Amazon basin. *Science Advances*, 5(9).

<https://doi.org/10.1126/sciadv.aav8681>

Ofrydopoulou, A., Nannou, C., Evgenidou, E., Christodoulou, A., & Lambropoulou, D. (2022). Assessment of a wide array of organic micropollutants of emerging concern in wastewater treatment plants in Greece: Occurrence, removals, mass loading and potential risks. *Science of The Total Environment*, 802, 149860.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149860>



Pasquini, L., Munoz, J. F., Pons, M. N., Yvon, J., Dauchy, X., France, X., Le, N. D., France-Lanord, C., & Görner, T. (2014). Occurrence of eight household micropollutants in urban wastewater and their fate in a wastewater treatment plant. Statistical evaluation. *Science of the Total Environment*, 481(1), 459–468.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.075>

Pessoa, G. de P., Santos, A. B. dos, Souza, N. C. de, Alves, J. A. C., & Nascimento, R. F. do. (2012). Desenvolvimento de metodologia para avaliar remoção de estrogênios em estações de tratamento de esgotos. *Química Nova*, 35(5), 968–973.

<https://doi.org/10.1590/s0100-40422012000500019>

Pessoa, G. P., de Souza, N. C., Vidal, C. B., Alves, J. A. C., Firmino, P. I. M., Nascimento, R. F., & dos Santos, A. B. (2014). Occurrence and removal of estrogens in Brazilian wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, 490, 288–295.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.008>

Phan, H. V., Hai, F. I., McDonald, J. A., Khan, S. J., Zhang, R., Price, W. E., Broeckmann, A., & Nghiem, L. D. (2015). Nutrient and trace organic contaminant removal from wastewater of a resort town: Comparison between a pilot and a full scale membrane bioreactor. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 40–48.

<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.02.010>

Quadra, G. R., Li, Z., Silva, P. S. A., Barros, N., Roland, F., & Sobek, A. (2021). Temporal and Spatial Variability of Micropollutants in a Brazilian Urban River. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 81(1), 142–154.

<https://doi.org/10.1007/s00244-021-00853-z>



- Ren, L., Ma, J., Chen, M., Qiao, Y., Dai, R., Li, X., & Wang, Z. (2022). Recent advances in electrocatalytic membrane for the removal of micropollutants from water and wastewater. *IScience*, 25(5), 104342. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104342>
- Ribas, P. P., dos Santos, E. O., Costa, C. C., & Gonzáles, P. L. S. (2021). Estudos sobre remoção de micropoluentes emergentes em efluentes no Brasil: uma revisão sistemática. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4558397>
- Ribas, P. P., Santos, E. O., Costa, C. C., & Gonzáles, P. L. S. (2022). Remoção de produtos farmacêuticos no tratamento avançado de matrizes aquosas: um estudo piloto. *Revista de Gestão de Água Da América Latina*, 19(1), 12–0. <https://doi.org/10.21168/reg.v19e12>
- Rico, A., de Oliveira, R., de Souza Nunes, G. S., Rizzi, C., Villa, S., López-Heras, I., Vighi, M., & Waichman, A. V. (2021). Pharmaceuticals and other urban contaminants threaten Amazonian freshwater ecosystems. *Environment International*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106702>
- Roberts, G. C., Nenes, A., Seinfeld, J. H., & Andreae, M. O. (2003). Impact of biomass burning on cloud properties in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(2). <https://doi.org/10.1029/2001jd000985>
- Rogowska, J., Cieszynska-Semenowicz, M., Ratajczyk, W., & Wolska, L. (2020). Micropollutants in treated wastewater. In *Ambio* (Vol. 49, Issue 2, pp. 487–503). <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01219-5>



- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4169–4189. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- Sekulic, M. T., Boskovic, N., Milanovic, M., Letic, N. G., Gligoric, E., & Pap, S. (2019). An insight into the adsorption of three emerging pharmaceutical contaminants on multifunctional carbonous adsorbent: Mechanisms, modelling and metal coadsorption. *Journal of Molecular Liquids*, 284, 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.04.020>
- SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. (2021). *Diagnóstico Temático - Serviços de Água e Esgoto*. [www.snis.gov.br](http://www.snis.gov.br)
- Tatarchuk, T., Paliychuk, N., Bitra, R. B., Shyichuk, A., Naushad, M. U., Mironyuk, I., & Ziółkowska, D. (2019). Adsorptive removal of toxic methylene blue and acid orange 7 dyes from aqueous medium using cobalt-zinc ferrite nanoadsorbents. *Desalination and Water Treatment*, 150, 374–385. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23751>
- Thomas, K. V., Araújo da Silva, F. M., Langford, K. H., de Souza, A. D. L., Nizzeto, L., & Waichman, A. V. (2014). Screening for selected human pharmaceuticals and cocaine in the urban streams of Manaus, Amazonas, Brazil. *Journal of the American Water Resources Association*, 50(2), 302–308. <https://doi.org/10.1111/jawr.12164>
- Tosun, J., Schaub, S., & Fleig, A. (2020). What determines regulatory preferences? Insights from micropollutants in surface waters. *Environmental Science & Policy*, 106, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.001>



- Undeman, E., Rasmusson, K., Kokorite, I., Leppänen, M. T., Larsen, M. M., Pazdro, K., & Siedlewicz, G. (2022). Micropollutants in urban wastewater: large-scale emission estimates and analysis of measured concentrations in the Baltic Sea catchment. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113559. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113559>
- United Nations. (2015). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Vassalle, L., García-Galán, M. J., Aquino, S. F., Afonso, R. J. de C. F., Ferrer, I., Passos, F., & R Mota, C. (2020). Can high rate algal ponds be used as post-treatment of UASB reactors to remove micropollutants? *Chemosphere*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125969>
- Von Sperling, M. (2016). Urban wastewater treatment in Brazil. *Minas Gerais Brazil*, August, 27. [www.iadb.org](http://www.iadb.org)
- Wang, J., Tian, Z., Huo, Y., Yang, M., Zheng, X., & Zhang, Y. (2018). Monitoring of 943 organic micropollutants in wastewater from municipal wastewater treatment plants with secondary and advanced treatment processes. *Journal of Environmental Sciences*, 67, 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.09.014>
- Xiao, K., Liang, S., Wang, X., Chen, C., & Huang, X. (2019). Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review. *Bioresource Technology*, 271, 473–481. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.061>
- Yang, Y. Y., Toor, G. S., Wilson, P. C., & Williams, C. F. (2017). Micropollutants in groundwater from septic systems: Transformations, transport mechanisms, and



human health risk assessment. *Water Research*, 123, 258–267.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.054>

Zaviska, F., Drogui, P., Grasmick, A., Azais, A., & Héran, M. (2013). Nanofiltration membrane bioreactor for removing pharmaceutical compounds. *Journal of Membrane Science*, 429, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.022>

Zhang, K., Wu, X., Luo, H., Wang, W., Yang, S., Chen, J., Chen, W., Chen, J., Mo, Y., & Li, L. (2021). Biochemical pathways and enhanced degradation of dioctyl phthalate (DEHP) by sodium alginate immobilization in MBR system. *Water Science and Technology*, 83(3), 664–677. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.605>