



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Mickaela Midon da Paixão

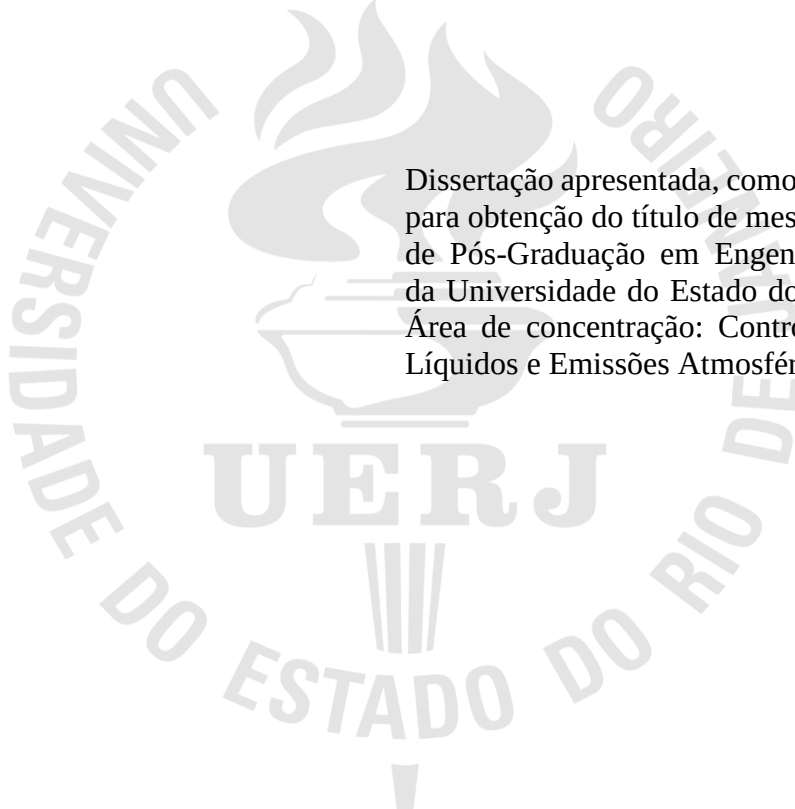
**ANÁLISE PRÁTICA E LEGAL SOBRE MICROPOLUENTES
EMERGENTES COM FOCO NO REÚSO POTÁVEL DE ÁGUA NO
BRASIL**

Rio de Janeiro

2024

Mickaela Midon da Paixão

**Análise prática e legal sobre micropoluentes emergentes com foco no reúso potável de
água no Brasil**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle de Efluentes Líquidos e Emissões Atmosféricas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Ana Silvia Pereira Santos

Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a. Renata de Oliveira Pereira

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

P149 Paixão, Mickaela Midon da.
Análise prática e legal sobre micropoluentes emergentes com foco no reúso
potável de água no Brasil / Mickaela Midon da Paixão. – 2024.
156 f.

Orientadora: Ana Silvia Pereira Santos.
Coorientadora: Renata de Oliveira Pereira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Água - Poluição - Legislação - Teses. 3.
Água - Reuso - Teses. 4. Água potável - Teses. I. Santos, Ana Silvia Pereira. II.
Pereira, Renata de Oliveira. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.16

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese,
desde que citada a fonte.



Assinatura

Data

Mickaela Midon da Paixão

**Análise prática e legal sobre micropoluentes emergentes com foco no reúso potável de
água no Brasil**

Dissertação apresentada, como requisito parcial
para obtenção do título de mestre, ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Área de concentração: Controle de Efluentes
Líquidos e Emissões Atmosféricas.

Aprovada em 23 de fevereiro de 2024.

Banca Examinadora:



Prof.ª Dr.ª. Ana Silvia Pereira Santos. (Orientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof.ª Dr.ª. Renata de Oliveira Pereira. (Coorientadora)

Faculdade de Engenharia – UFJF

Prof.ª Dr.ª. Ann Honor Mounteer

Universidade Federal de Viçosa – UFV

Prof.ª Dr.ª. Rosane Cristina de Andrade

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

A Deus, guia constante, e à minha família, farol de amor e apoio inabalável, dedico este trabalho com profunda gratidão.

AGRADECIMENTOS

Ao começar esta jornada de agradecimentos, minha primeira expressão de gratidão é dirigida a Deus, cuja orientação sutil e constante presença foram a bússola que guiou cada passo deste caminho desafiador. À minha mãe Rosana Midon e ao meu pai Moacir Muniz, a base sólida da minha existência, agradeço pelo amor que transcende palavras e pelos sacrifícios silenciosos que moldaram meu percurso.

Ao meu até então noivo (logo mais será meu companheiro para vida toda), Jônatas Machado, meu companheiro de jornada, cujo apoio e compreensão foram a âncora que me sustentou nos momentos de tempestade. Às amigas Ketlyn Tavares e Alice Martins, irmãs de coração, e ao amigo fiel Victor Cittadino, cuja presença marcou e tornou minha jornada muito mais leve.

Um agradecimento especial a Miguel Fernández, amigo e mestre, que não apenas compartilhou o conhecimento, mas também flexibilizou minhas horas de trabalho para possibilitar a execução deste projeto. Serei sempre grata por tudo que compartilhou comigo.

Às extraordinárias orientadoras, Ana Silvia Santos e Renata Pereira, expresso minha profunda gratidão. Com paciência e sabedoria, guiaram-me pelos intrincados labirintos da pesquisa, tornando possível transformar sonhos em realizações concretas. Este trabalho é o resultado de toda nossa jornada juntas, é uma conquista coletiva.

À UERJ, instituição que abraçou meu crescimento acadêmico, agradeço pelo ambiente propício ao aprendizado e pela oportunidade de expandir horizontes. Aos colegas da ABES RJ, agradeço pela colaboração e apoio mútuo. E a todos os amigos, sejam parte desta trajetória de forma direta ou indireta, a vocês dedico a riqueza dos momentos.

Este trabalho não é apenas um resultado acadêmico; é uma expressão de todas as mãos que, de alguma maneira, tocaram meu coração e me impulsionaram a alcançar voos mais altos. Cada palavra escrita é um tributo à força da união e à inabalável convicção de que, com amor e apoio mútuo, somos capazes de superar qualquer desafio. A todos, meu mais sincero agradecimento, meu coração transborda de gratidão por fazerem parte da minha história.

A água é a força motriz de toda a natureza.

Leonardo da Vinci

RESUMO

PAIXÃO, Mickaela Midon da. *Análise prática e legal sobre micropoluentes emergentes com foco no reúso potável de água no Brasil*. 2024. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido a partir de intensa revisão bibliográfica (recorte temporal de 5 anos, entre 2018 e 2023), em duas partes. Parte 1: entendimento amplo sobre as preocupações mais acentuadas relacionadas aos micropoluentes no contexto prático e legal do reúso potável de água no mundo. Parte 2: comparação desse cenário com os principais micropoluentes estudados no Brasil. A Parte 1 envolveu uma revisão integrativa para o estudo dos documentos legais relacionados à preocupação com os micropoluentes emergentes no contexto do reúso potável de água no mundo; e uma revisão sistemática para conhecimento geral das plantas de reúso potável de água em operação no mundo. A Parte 2 envolveu uma revisão sistemática sobre os micropoluentes mais estudados no Brasil (em português e em inglês) em diferentes matrizes aquáticas (água e esgoto). Como principais resultados, observou-se que na Parte 1, encontram-se em vigência, no mundo, 19 documentos reguladores (entre legais e orientadores), dos quais 6 abordam reúso potável direto (RPD) e indireto (RPI) conjuntamente, 11 apenas RPI e 2 apenas RPD. Os padrões para micropoluentes são definidos apenas em documentos que regulamentam RPI. Em relação às plantas em operação, 39 unidades foram estudadas, das quais 6 são RPD e 32 RPI. No âmbito dos aspectos legais, os compostos que levantaram mais preocupação foram: 1,4-dioxano, 17- β -estradiol, gemfibrozil; perfluorooctano sulfonato (PFOS), ácido perfluorooctanóico (PFOA), sucralose e triclosan. A ausência de padrões específicos para micropoluentes nas regulamentações de RPD é preocupante e destaca a importância de estabelecer diretrizes rigorosas que considerem a remoção eficiente de micropoluentes. Na Parte 2, os resultados demonstraram que o 17 α -etinilestradiol, o diclofenaco, a cafeína, o 17- β -estradiol e o ibuprofeno são os micropoluentes mais estudados no Brasil, destacando-os como as substâncias químicas de maior interesse em estudos ambientais e de saúde pública. Do total de compostos regulamentados em documentos específicos para o reúso potável de água no mundo, 33 já se encontram normatizados no Brasil pela Portaria de Potabilidade MS 888/2021. Dos 418 compostos investigados no contexto brasileiro, apenas 43 estão contemplados pela regulamentação estabelecida na Portaria MS 888/2021. De maneira geral, o trabalho permitiu elucidar importantes lacunas científicas relacionadas à preocupação com micropoluentes emergentes no contexto do reúso potável de água. De forma complementar, a concretização da indicação dos principais micropoluentes e seus padrões protetivos para uma futura regulamentação sobre reúso potável de água no Brasil é tema para um trabalho futuro, baseado nas conclusões deste. Conclui-se que, o estudo, além de demonstrar a viabilidade segura da prática, permitiu pavimentar um caminho mais assertivo para uma futura regulamentação do reúso potável de água no Brasil.

Palavras-chave: Contaminantes de preocupação emergente; Legislação; Regulação.

ABSTRACT

PAIXÃO, Mickaela Midon da. *Practical and legal analysis of emerging micropollutants with a focus on potable water reuse in Brazil*. 2024. 156 p. Dissertation (Master's in Environmental Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The present research work was developed based on an intense bibliographical review (a 5-year temporal scope, from 2018 to 2023), divided into two parts. Part 1: a comprehensive understanding of the most pronounced concerns related to micropollutants in the practical and legal context of potable water reuse worldwide. Part 2: a comparison of this scenario with the main micropollutants studied in Brazil. Part 1 involved an integrative review to study legal documents related to concerns about emerging micropollutants in the context of potable water reuse worldwide; and a systematic review for a general understanding of potable water reuse plants in operation worldwide. Part 2 involved a systematic review of the most studied micropollutants in Brazil (in Portuguese and English) in different aquatic matrices (water and sewage). As main results, it was observed that in Part 1, there are currently in force worldwide, 19 regulatory documents (including legal and guiding documents), of which 6 address direct potable reuse (DPR) and indirect potable reuse (IPR) jointly, 11 only IPR, and 2 only DPR. Standards for micropollutants are defined only in documents regulating IPR. Regarding operational plants, 39 units were studied, of which 6 are DPR and 32 are IPR. In terms of legal aspects, the compounds that raised the most concern were: 1,4-dioxane, 17- β -estradiol, gemfibrozil; perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA), sucralose, and triclosan. The absence of specific standards for micropollutants in DPR regulations is concerning and highlights the importance of establishing rigorous guidelines that consider efficient micropollutant removal. In Part 2, the results showed that 17 α -ethinylestradiol, diclofenac, caffeine, 17- β -estradiol, and ibuprofen are the most studied micropollutants in Brazil, highlighting them as the chemicals of greatest interest in environmental and public health studies. Of the total compounds regulated in specific documents for potable water reuse worldwide, 33 are already standardized in Brazil by MS 888/2021 Potability Ordinance. Of the 418 compounds investigated in the Brazilian context, only 43 are covered by the regulation established in MS 888/2021 Ordinance. In general, the work has elucidated important scientific gaps related to concerns about emerging micropollutants in the context of potable water reuse. Additionally, the implementation of the indication of the main micropollutants and their protective standards for future regulation on potable water reuse in Brazil is a subject for future work, based on the conclusions of this study. It is concluded that the study, besides demonstrating the safe viability of the practice, paved a more assertive path for future regulation of potable water reuse in Brazil.

Keywords: Contaminants of emerging concern; Legislation; Regulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Índice de atendimento total de água no Brasil	20
Figura 2 - Índice de atendimento urbano de água por municípios no Brasil	20
Figura 3 - Diferença entre a retenção de membranas	24
Figura 4 - Índice de atendimento de esgoto no Brasil	25
Figura 5 - Classificação do reúso de água	29
Figura 6 - Desenho esquemático do reúso potável direto (a) e do reúso potável indireto (b)..	31
Figura 7 - Correlação dos TTC desenvolvidos com as Etapas 1 e 2 da metodologia e, consequentemente, com o Objetivo geral e os objetivos específicos	40
Figura 8 - Metodologia da Parte 1	41
Figura 9 - Metodologia da Parte 2	44
Figura 10 – Linha do tempo de regulamentações/diretrizes de reúso potável de água	48
Figura 11 - Diagrama comparativo de regulamentações/diretrizes de acordo com o tipo de reúso potável e controle de micropoluentes	49
Figura 12 - Categoria de micropoluentes controlados por país/região	52
Figura 13 - Estações de tratamento de água potável ao redor do mundo, com ênfase no tipo (direta, indireta ou ambos) e na presença de regulamentações.....	61
Figura 14 -. Distribuição por estado das pesquisas nas buscas 1 e 2.....	67
Figura 15 - Relação anual do número de pesquisas sobre micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras de 2018 a 2023	68
Figura 16 - Compostos mais estudados nos últimos 5 anos (2018-2023) no Brasil por classe	70
Figura 17 - Análise temporal dos micropoluentes mais estudados na matriz água.....	72
Figura 18 - Análise temporal dos micropoluentes mais estudados na matriz esgoto	72
Figura 19 - Compostos estudados por 7 a 14 trabalhos e suas classes	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Trabalhos técnicos-científicos elaborados no âmbito desta dissertação para o desenvolvimento do estudo de micropoluentes visando a definição de padrões de reúso potável de água.....	39
Quadro 2 - Parâmetros de micropoluentes controlados em mais de uma regulamentação/diretriz	53
Quadro 3 – Comparação das concentrações de controles da Portaria 888/21 com os documentos de reúso potável.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Documentos regulatórios (diretiva ou lei) sobre reúso potável (direto ou indireto) no mundo e a definição de padrões para o controle de micropoluentes.	46
Tabela 2 - Plantas de reúso potável em operação	62
Tabela 3 - Relação das pesquisas por matriz aquáticas nas buscas 1 e 2	69
Tabela 4 - Distribuição do número de compostos em relação ao número de trabalhos	69
Tabela 5 - Comparação dos compostos regulamentados no mundo e pesquisados no Brasil ..	78
Tabela 6 - Comparação dos compostos regulamentados no mundo e pesquisados no Brasil ..	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
AR	Armazenamento
CAB	Carbono Ativado Biológico
CAG	Carvão Ativado Granular
CAP	Carvão Ativado em Pó
CC	Clarificação com Cal
CCL	Lista de Candidatos a Contaminantes
Cl	Cloração
CO	Coagulação
DP	Dessalinização Parcial
EETA	Encaminhado para Estação de Tratamento de Água
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
FB	Filtração Biológica
FCA	Filtração contínua de areia
FG	Filtração em meio Granular
FMR	Filtração à Margem do Rio
FO	Floculação
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogénio
ISO	International Organization for Standardization
MBR	Biorreator de Membrana
MF	Microfiltração
MGD	Milhões de galões por dia
O ₃	Ozônio
ODS 6	Objetivo do Desenvolvimento Sustentável nº 6
OI	Osmose Inversa
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PFOA	Ácido Perfluorooctanóico

PFOS	Ácido Perfluorooctano Sulfônico
POA	Processos Oxidativos avançados
PR	Peneira rotativa
RAE	Recarga de Aquífero por Espalhamento
RAI	Recarga de Aquífero por Injeção
RPD	Reúso Potável Direto
RPI	Reúso Potável Indireto
RPIS	Reúso Potável Indireto Superficial
TI	Troca Iônica
UF	Ultrafiltração
UV	Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1. OBJETIVOS.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Cenário nacional dos Recursos Hídricos e Saneamento Básico	17
2.1.1. Recursos Hídricos no Brasil.....	17
2.1.2. Saneamento Básico no Brasil.....	19
2.2. Reúso de água.....	28
2.2.1. Reúso Potável	31
2.2.2. Reúso Potável Indireto	33
2.2.3. Reúso Potável Indireto Não Planejado	34
2.3. Aspectos legais.....	35
2.4. Poluentes de preocupação emergente	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. Parte 1 – Aspectos legais e práticos do reúso potável de água no mundo	41
3.1.1. Aspectos legais do reúso potável no mundo (TTC1).....	42
3.1.2. Aspectos práticos do reúso potável no mundo (TTC 2)	43
3.2. Parte 2 – Micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras (TTC3).....	43
3.2.1. Aspectos gerais das buscas.....	44
3.2.2. Micropoluentes estudados e indicações para padrões protetivos.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1. Parte 1 – Aspectos legais e práticos do reúso potável de água no mundo	46
4.1.1. Aspectos legais do reúso potável no mundo (TTC1).....	46
4.1.2. Aspectos práticos do reúso potável no mundo (TTC 2)	60
4.2. Parte 2 – Micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras (TTC3).....	66
4.2.1. Aspectos gerais das buscas.....	66
4.2.2. Micropoluentes estudados e indicações para padrões protetivos.....	70
5. CONCLUSÕES.....	84
6. RECOMENDAÇÕES.....	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICES	101

INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento populacional, a exploração desmedida dos recursos naturais e as mudanças climáticas acentuam os impactos das secas ao redor do mundo (SAPKOTA, 2019). No contexto brasileiro, apesar da abundância hídrica e de diversos fatores, historicamente cultivamos uma cultura de excesso e desperdício de água. Isso demanda, no presente, uma gestão eficiente, segura e responsável dos recursos hídricos, assegurando quantidade e qualidade para todos os usos necessários.

No contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), nomeadamente em relação ao ODS6 (água e saneamento para todos), o reúso de água para consumo humano, seja direto ou indireto, destaca-se como uma estratégia para a gestão eficiente da água. O reúso potável indireto (RPI) envolve o lançamento dos efluentes tratados em corpos d'água para diluição no manancial e captação a jusante, enquanto o reúso potável direto (RPD) direciona os efluentes à Estação de Tratamento de Água (ETA) ou ao ponto de uso (CETESB, 2022). Hespanhol (2015) destaca o reúso da água como alternativa nos sistemas de tratamento, especialmente em grandes regiões metropolitanas e áreas mais vulneráveis. Adicionalmente, Frijins et al. (2016) afirmam que produzir água potável a partir de água para reúso pode ter custos inferiores aos da importação de água de regiões vizinhas e mais distantes.

Embora os benefícios do reúso de água sejam inquestionáveis, um desafio crucial reside na consolidação dessa prática no âmbito jurídico-administrativo. No cenário federal, o Brasil ainda carece de um documento normativo com padrões para a qualidade da água voltado ao reúso de água (SANTOS et al., 2020).

Uma preocupação em relação ao reúso potável de água são os compostos derivados de eventos contemporâneos que ignoram o ritmo de regeneração da natureza, causando danos irreparáveis. Esses compostos químicos, classificados como contaminantes de preocupação emergente pela USEPA (2014), são detectados em baixos níveis em diversas matrizes ambientais, representando uma ameaça à qualidade da água para consumo humano.

Frente aos compostos emergentes, regulamentações adicionais, como apontado por Alves (2016), tornam-se essenciais para o reúso potável, autorizando e estabelecendo condições mínimas para distribuição e consumo dessa água. Em anos anteriores, o foco principal em relação ao abastecimento de água era a contaminação fecal, ligada a doenças transmitidas pela água. Atualmente, os micropoluentes emergentes ganham destaque, associados a diversas

comorbidades, evidenciando a importância de regulamentações rigorosas para garantir a segurança da água para reúso.

Diante desse cenário, torna-se necessário um estudo aprofundado e sistemático sobre os aspectos legais e práticos que envolvem a relação entre micropoluentes e o reúso potável de água. Os estudos científicos devem embasar decisões técnicas e políticas relacionadas à definição de diretrizes mais assertivas para a garantia de uma prática de reúso potável de água segura e responsável no Brasil.

1. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Apresentar um estudo científico consolidado sobre os aspectos legais e práticos relacionados ao reúso potável de água no mundo, considerando a preocupação com os micropoluentes emergentes, de modo a orientar uma comparação com os principais micropoluentes estudados em âmbito nacional.

Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão integrativa sobre os aspectos legais que envolvem padrões de poluentes emergentes em reúso potável no mundo;
- Realizar uma revisão sistemática sobre plantas de reúso potável em operação no mundo, e suas tecnologias de tratamento para remoção de micropoluentes;
- Realizar uma revisão sistemática sobre os micropoluentes estudados em mananciais de abastecimento e nas águas residuárias brasileiras;
- Comparar os micropoluentes regulamentados no mundo no contexto do reúso potável de água com a predominância dos estudos desses compostos no Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cenário nacional dos Recursos Hídricos e Saneamento Básico

2.1.1. Recursos Hídricos no Brasil

O cenário nacional dos recursos hídricos no Brasil é marcado por uma riqueza abundante e, ao mesmo tempo, por desafios complexos. O país detém a maior disponibilidade de água doce do mundo, com aproximadamente 255 mil m³/s escoando por seu território, conforme dados da Agência Nacional de Águas (SNIS, 2023). No entanto, essa riqueza não está uniformemente distribuída, criando disparidades regionais significativas.

A Amazônia, detentora da maior parcela da disponibilidade hídrica, contrasta com outras regiões, como o Semiárido, historicamente afetado pela escassez de água. Essa desigualdade na distribuição da água desafia a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos no país. O Semiárido, compreendendo estados do Nordeste e norte de Minas Gerais, enfrenta não apenas desafios climáticos, mas também questões socioeconômicas associadas à falta de água, contribuindo para um ciclo de desenvolvimento desigual (LIMA et al., 2021).

As mudanças climáticas e o crescimento populacional agravam as pressões sobre os recursos hídricos brasileiros, resultando em episódios mais frequentes de estresse hídrico em diversas regiões. O Sudeste, por exemplo, lida não apenas com a alta demanda, mas também com a poluição dos corpos hídricos, evidenciando a complexidade dos desafios enfrentados pelas áreas urbanas.

Para enfrentar essa realidade complexa, estratégias como o reúso de água surgem como alternativas promissoras. A diversidade de desafios exige abordagens regionais diferenciadas, adaptadas às características específicas de cada localidade. A experiência internacional, como a prática sistematizada em países do Oriente Médio, África, Austrália e América do Norte, oferece *insights* valiosos para inspirar soluções locais (ANGELAKIS et al., 2018; ARAUJO et al., 2018).

O uso racional dos recursos hídricos, aliado a medidas de combate à poluição, redução do desperdício e a adoção de práticas sustentáveis, tornam-se essenciais. Ao entender e abordar as interconexões entre os desafios ambientais, climáticos e sociais, o Brasil pode construir uma base resiliente para o futuro. A gestão eficiente dos recursos hídricos não apenas garante o

abastecimento adequado, mas também contribui para o desenvolvimento socioeconômico equitativo em todo o território nacional.

O cenário do esgotamento sanitário no Brasil também é desafiador, refletindo a complexidade da infraestrutura necessária para atender às demandas crescentes. Apesar dos avanços nas últimas décadas, uma parcela significativa da população ainda não possui acesso adequado aos serviços de saneamento básico.

Muitas áreas urbanas e rurais enfrentam deficiências na cobertura de redes de esgoto, resultando em uma dependência significativa de sistemas de fossas sépticas ou mesmo na ausência de qualquer forma de tratamento considerado adequado. Isso não apenas representa um risco para a saúde pública, devido à contaminação de corpos d'água e ao surgimento de doenças relacionadas à falta de saneamento, mas também impacta negativamente o meio ambiente (GALVÃO, 2009).

Os desafios no setor incluem a expansão da infraestrutura de esgotamento sanitário, a melhoria da qualidade dos serviços existentes e a conscientização da população sobre a importância da gestão adequada dos resíduos. Investimentos contínuos e políticas públicas eficazes são cruciais para abordar as lacunas existentes e alcançar uma cobertura mais ampla e eficiente. O reúso potável de água surge como uma solução estratégica para atender às crescentes demandas hídricas da população brasileira (SOUSA et al., 2019).

Em um cenário marcado por desafios relacionados à escassez e distribuição desigual dos recursos hídricos, essa prática oferece uma fonte alternativa e sustentável de abastecimento. Ao tratar e purificar águas residuais para torná-las adequadas ao consumo humano, o reúso potável desempenha um papel crucial na diversificação das fontes de água, reduzindo a pressão sobre os mananciais convencionais (FERREIRA, 2021).

Esse benefício é particularmente significativo em regiões propensas a seca, estresse ou escassez hídrica ou sujeitas a eventos climáticos extremos. Além de aumentar a segurança hídrica, o reúso potável contribui para a conservação dos recursos naturais, alinhando-se aos princípios da economia circular. Transformar águas residuais em uma fonte valiosa não apenas mitiga o impacto ambiental do descarte inadequado, mas também preserva ecossistemas aquáticos (FERREIRA, 2021).

No entanto, é crucial investir em tecnologias avançadas de tratamento e infraestrutura, além de implementar políticas eficazes. A conscientização da população sobre a segurança e os benefícios do reúso potável é igualmente essencial para garantir o sucesso e a aceitação generalizada dessa prática. Ao integrar o reúso potável de água com melhorias na gestão de esgotos, o Brasil não apenas atenderá às demandas crescentes, mas também dará passos

significativos em direção a um serviço de saneamento básico mais eficiente e de alta qualidade (SOUSA et al., 2019). Soares e Santos (2021) ainda destacam a necessidade de avanços em relação à universalização dos serviços de esgotamento sanitário, com operação adequada, segura e responsável para a produção de água para reúso com qualidades compatíveis aos usos pretendidos.

2.1.2. Saneamento Básico no Brasil

De acordo com Mota et al. (2012) o saneamento pode ser entendido como uma meta comum diante de sua essencialidade à vida humana e à preservação do meio ambiente, evidenciando seu caráter público e o dever do governo em promovê-lo, sendo um bem social que integra políticas públicas e sociais.

A Fundação Nacional da Saúde faz a definição de saneamento ambiental como “o conjunto de ações socioeconômicas que têm por objetivo alcançar salubridade ambiental, por meio de abastecimento de água potável, coleta e disposição sanitária de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, promoção da disciplina sanitária de uso do solo, drenagem urbana, controle de doenças transmissíveis e demais serviços e obras especializadas, com a finalidade de proteger e melhorar as condições de vida urbana e rural” (FUNASA, 2015).

A Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020 define saneamento por meio de quatro serviços que segundo ele, constituem todas as áreas essenciais ligadas ao que chamamos atualmente de saneamento básico:

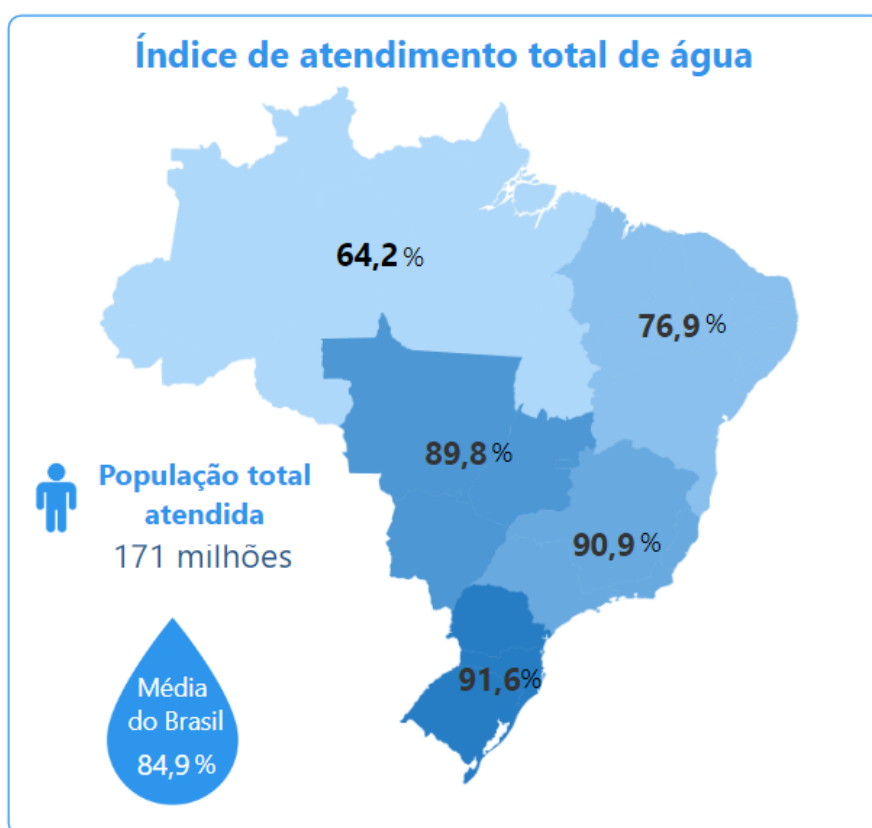
1. Abastecimento de água;
2. Esgotamento sanitário;
3. Limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos e;
4. Drenagem e manejo das águas pluviais.

Esses serviços atuam de maneira integrada para garantir a saúde pública e a preservação ambiental. No entanto, no presente trabalho, serão explorados com maior detalhe o sistema de abastecimento de água, que visa fornecer água potável à população, e o sistema de tratamento de esgoto, responsável por purificar as águas residuais antes de serem devolvidas ao meio ambiente. Ambos desempenham papéis cruciais na promoção da qualidade de vida e na prevenção de doenças relacionadas à falta de saneamento adequado.

- **TRATAMENTO DE ÁGUA**

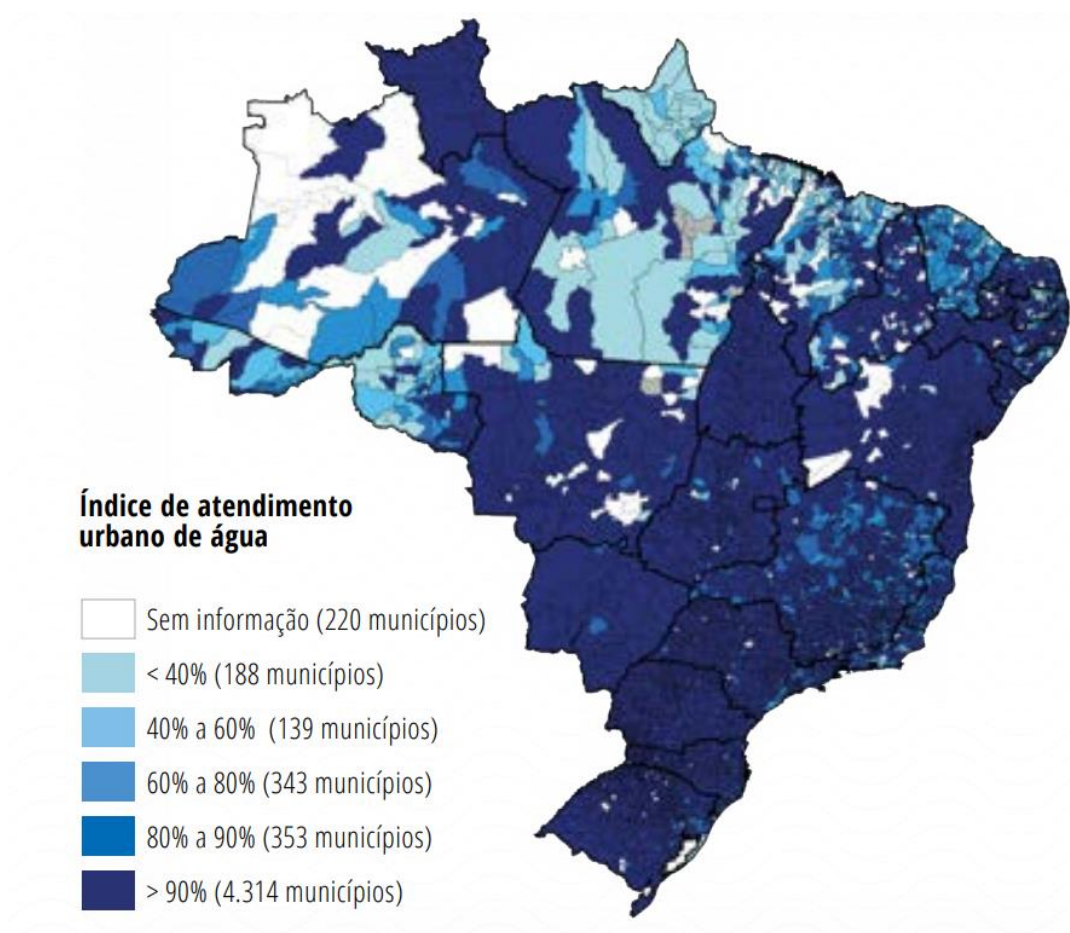
Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), o índice de atendimento total de água no Brasil é de 84,9%, abrangendo uma população de 171 milhões de pessoas como é apresentado na Figura 1. A oferta de água potável no Brasil ocupa 85º posição em um ranking de 137 países (WHO, 2021). Esses dados evidenciam avanços na oferta de serviços de abastecimento de água, mas também apontam para desafios em outras regiões do país. A análise desse índice contribui para compreender a distribuição e eficácia dos serviços de saneamento, fundamentais para a qualidade de vida da população. A Figura 2 apresenta o índice de atendimento urbano no país, bem como o número de municípios enquadrados em tal faixa de atendimento.

Figura 1 - Índice de atendimento total de água no Brasil



Fonte: SNIS (2023).

Figura 2 - Índice de atendimento urbano de água por municípios no Brasil



Fonte: SNIS (2023).

Para assegurar que a água alcance os padrões estabelecidos de potabilidade, tornando-a apta para consumo humano sem apresentar ameaças à saúde dos indivíduos, são definidos limites para uma variedade de parâmetros físicos, químicos, microbiológicos e organolépticos. Essas diretrizes aplicam-se tanto aos sistemas convencionais de fornecimento de água quanto às alternativas de abastecimento. Essa responsabilidade foi atribuída ao Ministério da Saúde desde a promulgação do Decreto nº 79.367, em 9 de março de 1977. Atualmente, a Portaria do Ministério da Saúde nº 888/2021 é o documento legal que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021).

O processo de tratamento da água possui como metas primordiais a inativação e a remoção de organismos responsáveis por diversas doenças de veiculação hídrica, tais como amebíase, giardíase, gastroenterite, febre tifoide, hepatite infecciosa e cólera, entre outras. Adicionalmente, o tratamento visa remover impurezas que conferem turbidez e cor à água, conforme documentado por Mendonça et al. (2007), Datasus (2015), Uhr et al. (2016) e o Ministério da Saúde (2006).

A complexidade do tratamento varia de acordo com o teor de impurezas presentes na água, sendo categorizado como simples, convencional (o método mais difundido) ou avançado. Este processo desempenha um papel crucial na garantia da qualidade da água fornecida à população, contribuindo para a promoção da saúde pública e prevenção de enfermidades associadas ao consumo de água contaminada (UHR, et al., 2016).

O método de tratamento simples fundamenta-se na desinfecção da água, sendo geralmente aplicado em corpos d'água superficiais classificados como classe especial ou classe 1, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005), além de ser utilizado em fontes subterrâneas. Por outro lado, o tratamento convencional, composto por etapas sequenciais de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, destaca-se como a abordagem mais comumente empregada em águas de superfície.

Por sua vez, o tratamento avançado, conforme documentado por Bernardo et al. (2017), incorpora etapas adicionais visando aprimorar a qualidade da água. Algumas dessas etapas incluem a introdução de carvão ativado e processos de oxidação ou alcalinização. Essa abordagem mais complexa se revela crucial em situações em que são necessárias medidas adicionais para atender aos padrões exigidos de potabilidade, demonstrando-se como uma estratégia eficaz para lidar com desafios específicos relacionados à qualidade da água.

Atualmente, no Brasil, os mananciais de abastecimento vêm se apresentando cada vez mais poluídos e contaminados. Nesse sentido, o tratamento avançado vem se tornando cada vez mais necessário, nomeadamente em regiões de alto adensamento populacional. Nestes casos, os mananciais se apresentam com qualidade bastante reduzida, caracterizando um reúso potável indireto de água, que ocorre sem planejamento. Assim, a aplicação consciente e regulamentada do reúso potável indireto, pode ser um grande avanço, inclusive para o entendimento geral da prática de lançamento de efluente a montante de pontos de captação de água para abastecimento.

As tecnologias de tratamento de água, atualmente envolvidas na produção de água para o consumo humano, geralmente, não levam em consideração a necessidade de remoção de micropoluentes, mesmo em condições em que a situação de lançamento de esgotos (nem sempre tratados) à montante da captação para abastecimento é conhecida. É neste sentido que a abordagem legal e prática do reúso potável de água, objeto do presente estudo, pode ser de grande relevância para as tomadas de decisão mais assertivas no que diz respeito ao abastecimento de água para o consumo humano em todo o território nacional.

Devido à limitação dos métodos convencionais de tratamento de água empregados nas ETAs, que não são projetados nem eficazes para eliminar uma grande variedade de compostos

emergentes, como fármacos e pesticidas, conforme destacado por Silva et al. (2016), torna-se imperativo recorrer a processos de tratamento alternativos e avançados. Nesse contexto, ganham relevância, técnicas como os processos de separação por membranas, exemplificados pelas modalidades de osmose inversa (OI) e ultrafiltração (UF), conforme evidenciado por Couto et al. (2020; 2018), Rodriguez-Mozaz et al. (2015), Zheng et al. (2015) e Brião et al. (2019).

A introdução desses métodos mais sofisticados destaca-se como uma resposta necessária diante da demanda por soluções eficazes na remoção de compostos emergentes, cuja presença na água representa um desafio significativo para os métodos tradicionais de tratamento. A aplicação de técnicas como osmose inversa e ultrafiltração reflete a busca constante por inovação no campo do tratamento de água, visando assegurar a pureza e a conformidade com os padrões de qualidade, especialmente diante do aumento da presença de substâncias emergentes no ambiente aquático.

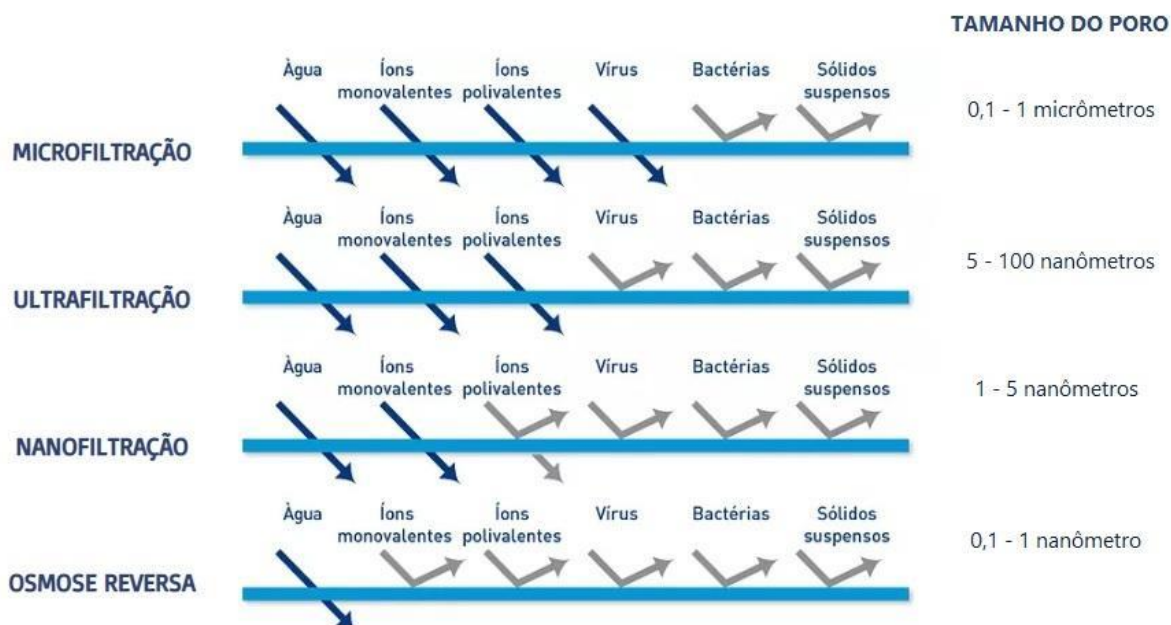
Dentre os processos avançados de tratamento, que são combinados com sistemas de tratamento convencional para garantir a remoção eficiente destes contaminantes, pode-se destacar o processo de tratamento de água por osmose inversa. Segundo Kaur et al. (2022) a osmose inversa surgiu em meados da década de 1950, porém só ficou comercialmente disponível na década de 1970. Este processo envolve a passagem da água através de uma membrana semipermeável para remover íons, moléculas orgânicas e partículas, deixando a água tratada do outro lado da membrana.

Já o tratamento de água por ultrafiltração (UF) surgiu na década de 1960, e ficou comercialmente disponível a partir dos anos 1980. A tecnologia de UF se destaca ao empregar um mecanismo de barreira física, que demonstra habilidade para reter poluentes ligeiramente superiores à porosidade das membranas convencionais. A singularidade central da UF reside em sua capacidade de realizar o controle seletivo, retraindo determinadas substâncias e permitindo a passagem de outras, uma característica intrinsecamente relacionada à meticulosa seleção do material da membrana e ao ajuste preciso do tamanho do poro, como discutido por Arkhangelsky et al. (2012).

O emprego criterioso de materiais de membrana e a consideração cuidadosa do tamanho do poro são fatores preponderantes no desempenho eficaz da ultrafiltração. Essa abordagem não apenas ressalta a importância da engenharia de materiais, mas também destaca a capacidade inovadora da UF em fornecer uma barreira eficaz contra poluentes, superando as limitações das

membranas convencionais. A Figura 3 mostra a comparação do desempenho das membranas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa.

Figura 3 - Diferença entre a retenção de membranas



Fonte: NEOWATER (2022)

Existem ainda os processos de oxidação avançados (POA), que segundo Lin et al. (2022), são de grande eficiência quanto à remoção de micropoluentes. Uma solução para garantir a remoção quase completa de micropoluentes seria a purificação da água e efluentes por POAs e membranas de alta retenção de forma complementar às membranas convencionais (LIU et al., 2022). Os POAs conseguem degradar poluentes orgânicos persistentes e refratários a tratamento convencionais e são baseados na utilização de espécies altamente oxidantes para promover uma degradação mais eficaz do poluente a ser tratado. Os POAs podem ser utilizados em combinação com processos biológicos, com o intuito de aumentar a biodegradabilidade de compostos recalcitrantes diminuindo assim o tempo demandado para o tratamento via processos biológicos tradicionais. Os processos utilizados são a fotocatalise com dióxido de titânio/ultravioleta (TiO_2/UV), peróxido de hidrogênio/UV ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) e o Foto-Fenton, entre outros (FIOREZE & SCHMACHTENBERG, 2014).

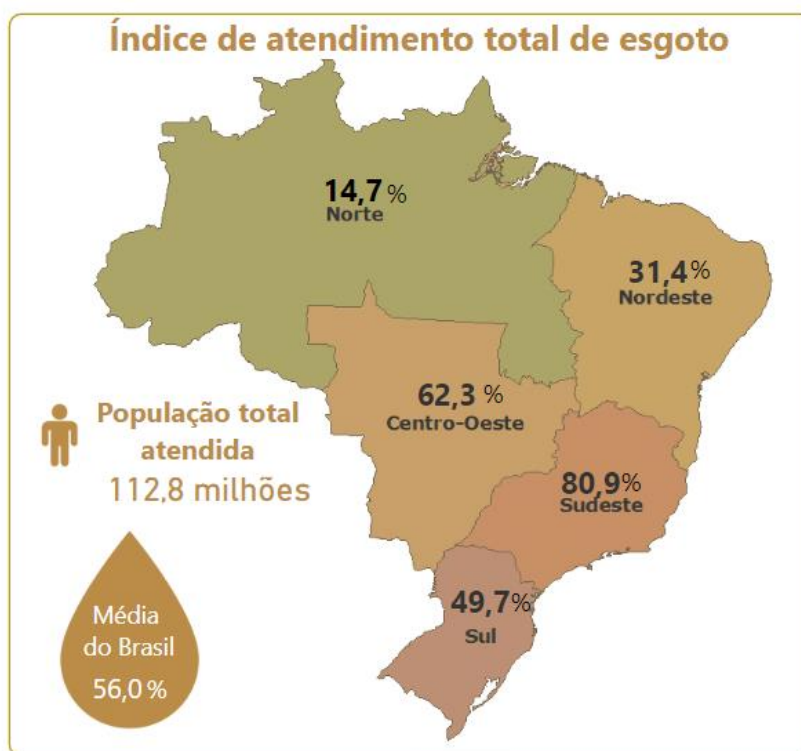
- TRATAMENTO DE ESGOTO

Os esgotos sanitários representam para a sociedade um saldo energético inaproveitável. Entretanto para organismos decompositores, a matéria orgânica dos esgotos representa uma

fonte de energia indispensável à sobrevivência e à realização de suas funções ecológicas, principalmente a reciclagem dos nutrientes (DIAS, 2003).

O índice de atendimento total do serviço de esgotamento sanitário no Brasil revela disparidades significativas entre as regiões do país. Enquanto a região Sudeste possui uma cobertura de 80,9%, indicando um acesso relativamente alto, a região Norte enfrenta uma realidade desafiadora, com apenas 14,7% de atendimento. Essa discrepância reflete desigualdades socioeconômicas e estruturais que impactam diretamente a qualidade de vida da população como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Índice de atendimento de esgoto no Brasil



Fonte: SNIS (2023).

Na região Sudeste, onde a infraestrutura é mais desenvolvida, cerca de 80% dos habitantes desfrutam de serviços de coleta dos esgotos. Isso não apenas melhora as condições de saúde, mas também contribui para a preservação ambiental. No entanto, ao se deslocar para a região Norte, a carência de investimentos em infraestrutura resulta em uma significativa parcela da população sem acesso adequado a serviços de esgoto, implicando em sérias consequências para a saúde pública e o meio ambiente.

Os números revelam que 112,8 milhões de pessoas no Brasil ainda enfrentam desafios no que diz respeito ao saneamento básico. Essa lacuna impacta diretamente aspectos como o surgimento de doenças relacionadas à falta de higiene, além de amplificar as disparidades sociais entre as regiões (SNIS, 2023).

A questão do saneamento básico não é apenas um desafio técnico, mas também uma questão de prioridade e políticas públicas. Investimentos direcionados, políticas de conscientização e ações efetivas são necessárias para reduzir essa disparidade e garantir que todos os brasileiros tenham acesso a condições dignas de saneamento. A busca por soluções inclusivas e sustentáveis é crucial para construir um futuro mais equitativo e saudável para todas as regiões do país. Vale ressaltar ainda que de acordo com WHO (2021), o Brasil se encontra na 76ª posição no ranking de atendimento nos serviços de esgotos dos 129 países estudados.

Segundo a NBR 9648/86 da ABNT, esgoto sanitário pode ser definido como despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária, sendo que:

- Esgoto doméstico: pode ser entendido como despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas;
- Esgoto industrial: pode ser entendido como despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos;
- Águas de infiltração: pode ser entendido como toda água proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações;
- Contribuição pluvial parasitária: pode ser entendido como a parcela de águas provenientes da chuva inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário.

Essas definições determinaram a origem dos componentes do esgoto sanitário. Esgoto doméstico é a parte mais importante e abundante do esgoto sanitário. Trata-se do resultado do uso de água em instalações sanitárias de domicílios, instituições comerciais, instituições públicas, e instalações sanitárias de instituições industriais (DIAS, 2003).

O sistema de esgoto doméstico para serviços coletivos geralmente consiste em sistemas de coleta/transporte e tratamento/disposição final. No entanto, devido ao alto custo de implantação, nem todos os componentes são sempre implantados em uma etapa. Dentro da faixa projetada de crescimento populacional e expansão da área de serviço, os projetos podem ser concebidos e expandidos em mais de uma fase de implementação (DIAS, 2003).

Difícilmente a capacidade de assimilação do corpo hídrico é suficiente para diluir a carga poluidora dos esgotos lançados. Na maioria dos casos a carga de efluente lançada excede

a capacidade de autodepuração. Em casos como este, para se evitar danos ambientais, à saúde da fauna local e à saúde humana, se reduz a carga poluidora até um nível que ela possa ser absorvida pelo corpo receptor. A ação a ser tomada para que a carga consiga atingir este nível, é submeter os esgotos a uma ou mais técnicas de tratamento (DA-RIN, 2021).

Ainda de acordo com Da-Rin (2021), usualmente os processos de tratamento do esgoto são divididos em estágios, são eles:

- Preliminar;
- Primário;
- Secundário; e
- Terciário.

O objetivo do tratamento preliminar é remover os sólidos grosseiros e de areias, por meio de mecanismos físicos (gradeamento, sedimentação e outros) (SAMUEL, 2011). As principais finalidades da remoção dos sólidos grosseiros são as proteções dos dispositivos de transporte de esgotos (bombas e tubulações), das unidades de tratamentos subsequentes e dos corpos receptores. A retirada de areia tem o objetivo básico de evitar a abrasão nos equipamentos e tubulações, eliminar ou minimizar a possibilidade de obstrução em tubulações, tanques, sifões e outros, além de facilitar o transporte do líquido. Normalmente, junto com o tratamento preliminar existe uma unidade para medir a vazão.

Após passarem pelas unidades de tratamento preliminar, os esgotos ainda possuem sólidos em suspensão não grosseiros, podendo ser removidos parcialmente em unidades de sedimentação. A matéria orgânica em suspensão compõe uma parte significativa destes sólidos. Por isso sua remoção por processos simples como a sedimentação gera a redução da carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) dirigida ao tratamento secundário, onde a sua remoção é mais custosa (VON SPERLING, 2011).

De acordo com Da-Rin (2021), se pode denominar tratamento secundário como sendo os processos biológicos utilizados para estabilizar bioquimicamente a matéria orgânica contida no esgoto bruto ou no efluente advindo do tratamento primário, assim como para efetuar a remoção e a disposição final ou reciclagem das substâncias formadas no processo biológico. Este tratamento pode incluir as seguintes operações:

- Filtração biológica;
- Lagoas de estabilização (maturação, facultativas e anaeróbias);
- Lodos ativados e suas variantes;
- Tratamento anaeróbio.

Após o tratamento secundário as águas residuais tratadas possuem um nível reduzido de poluição por matéria orgânica, podendo em boa parte dos casos, ser despejadas no meio ambiente (LOUREIRO, 2015). No entanto, os efluentes secundários ainda podem apresentar concentrações consideráveis de poluentes específicos que podem ser indesejados em áreas sensíveis. Este é o caso dos organismos patogênicos em águas destinadas ao contato/abastecimento humano e dos nutrientes em corpos d'água lênticos mais suscetíveis à eutrofização. Em geral, a etapa secundária apresenta baixa eficiência para a remoção desses poluentes, necessitando assim, de uma etapa avançada para promover efluentes mais condizentes com as características locais do corpo d'água receptor.

O tratamento terciário (ou avançado) envolve os processos destinados a remover, do efluente do tratamento secundário substâncias em solução, partículas finamente divididas em suspensão, poluentes ou impurezas específicas, ou a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário, como metais, micro-organismos patogênicos, fósforo, nitrogênio e outros (SAMUEL, 2011; DA-RIN, 2021).

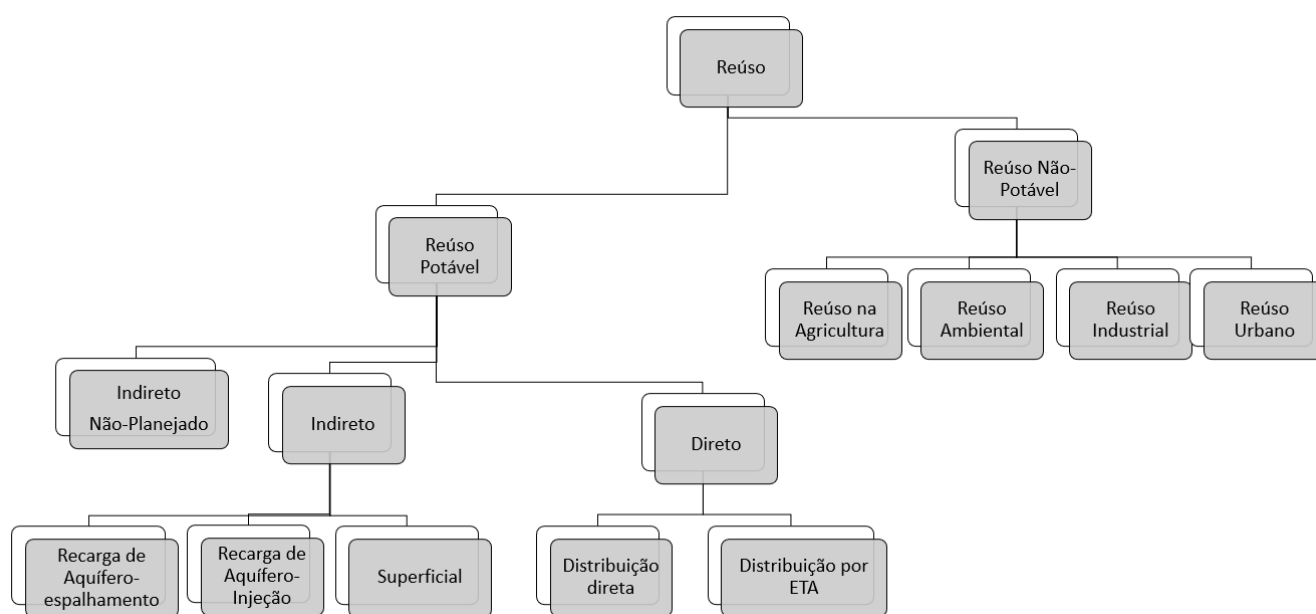
2.2. Reúso de água

Frente à crescente insegurança hídrica que assola o mundo contemporâneo, especialmente em regiões mais áridas, a prática de reúso de água a partir do efluente tratado emerge como uma solução cada vez mais proeminente. A água reciclada, recuperada ou destinada ao reúso é oficialmente reconhecida pela Organização das Nações Unidas como uma fonte alternativa e confiável capaz de atender a uma considerável parcela das demandas hídricas globais, como apontado pelo WWAP (2017).

Nesse contexto, além de prover uma fonte alternativa de água para diversas finalidades, a implementação do reúso de água desempenha um papel crucial na atenuação das pressões hídricas regionais, reduzindo os impactos de conflitos relacionados ao uso da água e contribuindo para a mitigação da poluição hídrica. Adicionalmente, nos países classificados como de baixa e média renda, a prática do reúso de água pode servir como um catalisador para aumentar os índices de tratamento de esgotos e aprimorar as práticas operacionais visando alcançar padrões desejados de qualidade, impulsionando, por conseguinte, o desenvolvimento socioeconômico, conforme argumentado por Lima et al. (2021). O reúso de água, assim, apresenta-se não apenas como uma estratégia sustentável para enfrentar os desafios hídricos globais, mas também como um vetor promissor para o progresso social e econômico em diversas comunidades.

O reúso potável de água, uma prática ecoeficiente, desafia as abordagens tradicionais de consumo e tratamento de água. Essa estratégia visa maximizar a utilização dos recursos hídricos, tratando as águas residuais de forma a torná-las seguras para o consumo humano (OLIVEIRA et al., 2018). A Figura 5 mostra como o reúso de água pode ser classificado de acordo com seus múltiplos usos.

Figura 5 - Classificação do reúso de água



Fonte: A autora

O reúso não potável, que envolve o uso de efluente tratado para fins que não sejam consumo humano, foi amplamente adotado em todas as suas categorias. No entanto, no Brasil, a prática ainda não foi regulamentada a nível federal e consequentemente, também não foi institucionalizada (LIMA et al., 2021).

Para o reúso não potável de água, o nível de tratamento do efluente varia conforme o uso pretendido. No entanto, quando se trata de reúso potável, a preocupação torna-se maior e a aceitabilidade pública diminui. A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2006), por exemplo, não recomendou a prática de reúso potável direto em sua publicação de 2006. No entanto, 10 anos depois, a própria OMS publicou o documento intitulado “Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water” (OMS, 2017), demonstrando que essa realidade está mudando globalmente.

Os usos não potáveis destinam-se a aplicações agrícolas, industriais e urbanas, além de outras variantes possíveis como uso ambiental e piscicultura/aquicultura.

O reúso de água na agricultura refere-se à utilização de água residuária previamente tratada, em processos agrícolas, como irrigação. Algumas regiões agrícolas brasileiras implementam sistemas de irrigação com água proveniente de fontes não potáveis, reduzindo a pressão sobre os recursos hídricos convencionais.

Empresas e indústrias brasileiras adotam sistemas de tratamento de água para reúso em atividades que não demandam água potável, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos, como é o caso do Aquapolo Ambiental. Localizado na região metropolitana de São Paulo, o Aquapolo destaca-se como um projeto inovador de reúso de água, fruto da parceria entre a Sabesp e a GS Inima. Com uma avançada estação de tratamento de esgoto, o Aquapolo fornece água tratada para uso industrial, contribuindo significativamente para a redução da demanda por água potável nas indústrias locais.

O reúso de água urbano concentra-se na utilização de água residuária tratada para usos não potáveis em áreas urbanas, como descarga de sanitários, lavagem de logradouros, lavagem de veículos e irrigação de espaços públicos. Alguns edifícios e empreendimento urbanos brasileiros implementam sistemas de reúso de água, especialmente para a irrigação de jardins e lavagem de áreas comuns.

É crucial ressaltar que a viabilidade do reúso de água, especialmente considerando o efluente tratado, está intrinsecamente ligada à disponibilidade de esgoto tratado para essa finalidade. Contudo, no Brasil, a universalização desse serviço ainda se encontra distante de ser alcançada, dado que apenas cerca de 43% da população é atendida por coleta e tratamento de esgotos, conforme apontado pelo SNIS (2023).

Além disso, em relação à qualidade do efluente tratado, persiste um déficit considerável. De acordo com a ANA (2017), aproximadamente 30% do efluente tratado no país apresenta uma eficiência de remoção de matéria orgânica inferior a 80%, enquanto Lima et al. (2021) indicam que apenas 7% da vazão total coletada e tratada passa por etapas terciárias de desinfecção. Diante desse cenário, há uma imperativa necessidade de aprimoramento das unidades com desempenho inferior, visando possibilitar um planejamento efetivo do reúso em regiões que demonstram potencial.

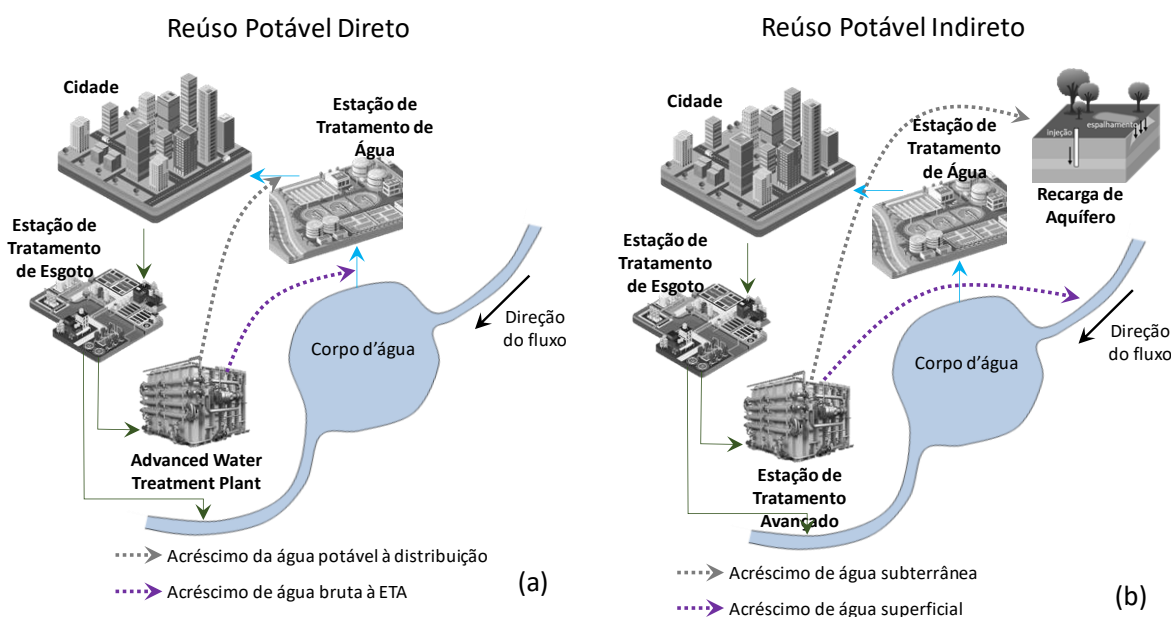
Ademais, é notório que cada forma de reúso demanda uma qualidade específica de água, a qual é determinada pela tecnologia de tratamento adotada na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Portanto, para assegurar a qualidade exigida, é fundamental estabelecer padrões, critérios e diretrizes alinhados a um documento regulador. Independentemente do nível administrativo (municipal, estadual ou federal), o documento regulador, devidamente adaptado aos objetivos e características locais, deve visar possibilitar, orientar e incentivar a prática de

reúso de forma segura e responsável. O estabelecimento desse arcabouço normativo representa um passo essencial na promoção da gestão sustentável dos recursos hídricos e na consolidação do reúso como uma prática ambientalmente benéfica e socialmente responsável (LIMA et al., 2021).

No contexto do reúso potável de água destacam-se duas modalidades: reúso potável direto (RPD) e reúso potável indireto (RPI). Ainda, o RPI pode ser classificado como não planejado, quando simplesmente adota-se o lançamento de efluente (tratado ou não) a montante de uma captação, sem qualquer tipo de planejamento.

Segundo Santos et al. (2022), o RPD acontece quando o efluente do tratamento avançado é enviado diretamente para a estação de tratamento de água ou para o sistema de distribuição de água potável. Por outro lado, o RPI considera a diluição das águas residuais tratadas (a nível avançado) nos mananciais (superficiais ou subterrâneos), antes da captação de água bruta para tratamento e posterior distribuição de água potável. A Figura 6 apresenta o desenho esquemático dos dois tipos de reúso potável de água e suas principais características.

Figura 6 - Desenho esquemático do reúso potável direto (a) e do reúso potável indireto (b).



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2022)

2.2.1. Reúso Potável

Desde 1968, água de reúso foi adicionada ao sistema de abastecimento de água de forma direta na rede de distribuição de água da cidade de Windhoek, Namíbia (ANGELAKIS et al., 2018).

Conforme mencionado, no RPD, as águas tratadas são encaminhadas diretamente para o sistema de abastecimento de água potável, sem a necessidade de diluição em corpos hídricos naturais. Esta abordagem demanda tecnologias avançadas de tratamento, como os processos de osmose inversa e desinfecção ultravioleta, assegurando que as águas atinjam os padrões exigidos pelas normas sanitárias. No RPD, a água de reúso desempenha um papel fundamental ao ser utilizada para complementar o fornecimento de água bruta. Essa complementação ocorre por meio da mistura prévia, antes que o fluxo combinado seja submetido ao tratamento em uma estação de tratamento de água, conforme discutido por Angelakis et al. (2018).

Conforme destacado por Tchobanoglous et al. (2011), se a instalação de tratamento de água de reúso for concebida para também operar como uma estação de tratamento de água convencional, a água tratada final pode potencialmente ser introduzida diretamente no sistema de distribuição de água potável. No contexto do RPD, há a possibilidade de projetar, de forma opcional, um *buffer* de armazenamento, proporcionando maior flexibilidade operacional e garantindo uma oferta contínua e estável de água tratada. Esse *buffer* de armazenamento representa uma estratégia adicional para lidar com flutuações na demanda ou eventuais variações na qualidade da água de reúso, contribuindo para otimizar a eficiência e a confiabilidade do sistema. O *buffer* é uma instalação de contenção de armazenamento de água projetada para reter água de reúso por um período específico, possibilitando correções no processo ou sistema em caso de falha da instalação, evitando misturas indesejadas e contribuindo para garantir a qualidade da água potável. No caso dos *buffers* para RPD, esse armazenamento pode ser utilizado para:

- (a) Prover uma instalação de contenção de armazenamento de água com uma capacidade volumétrica suficiente para reter água tratada de reúso por um período especificado, permitindo a implementação de correções no processo ou sistema em caso de falha da instalação. Isso visa assegurar a disponibilidade contínua de água tratada, garantindo a confiabilidade do sistema e a manutenção dos padrões de qualidade.
- (b) Prevenir a mistura de água tratada de reúso que não esteja em conformidade com os padrões de qualidade da água estabelecidos com outras fontes de água bruta. Essa medida visa preservar a integridade da água tratada, evitando a contaminação

por fontes que possam comprometer a qualidade final do recurso hídrico, contribuindo para a manutenção dos padrões exigidos.

- (c) Evitar a adição de água de reúso final que não atende aos padrões de qualidade da água ao sistema de distribuição de água potável. Essa precaução é essencial para garantir que apenas água de qualidade, que atenda aos requisitos estabelecidos, seja introduzida no sistema de abastecimento de água potável, protegendo a saúde pública e mantendo a conformidade com as normas regulatórias.

Assim, o uso integrado da água de reúso no âmbito do RPD não apenas atua como uma solução para suplementar a oferta de água bruta, mas também oferece a possibilidade de uma incorporação mais direta e eficiente no sistema de distribuição de água potável, aumentando a versatilidade e a adaptação do processo às demandas específicas de cada região. Essa abordagem integrada destaca o potencial significativo do RPD não apenas na produção sustentável de água, mas também na sua integração harmoniosa com os sistemas existentes de abastecimento de água.

2.2.2. Reúso Potável Indireto

Já no RPI, conforme mencionado, as águas tratadas são introduzidas em corpos hídricos naturais, passando por processos de diluição antes de serem captadas para o abastecimento. Essa modalidade oferece uma flexibilidade maior e é comumente adotada em áreas urbanas, onde a infraestrutura facilita a integração desses fluxos de água recuperada ao sistema convencional. No RPI, a água tratada avançada é introduzida em um *buffer* ambiental (por exemplo, aquífero subterrâneo ou corpo d'água superficial) para garantir a segurança da água tratada, proporcionando tempo de retenção suficiente e perdendo sua identidade ao se misturar com outras águas locais antes de ser retirada para reúso potável (ANGELAKIS et al., 2018).

O RPI por recarga de aquífero por espalhamento é uma abordagem que envolve a infiltração controlada de água de reúso no solo, com o objetivo de recarregar os aquíferos subterrâneos. Nesse processo, a água tratada é liberada em áreas específicas, permitindo que ela se infiltre naturalmente no solo, aumentando gradualmente o nível do aquífero. Durante essa percolação, ocorre uma série de processos físicos, químicos e biológicos que contribuem para a purificação adicional da água (SANTOS et al., 2020).

O sistema de reabastecimento de água do Condado de Orange, na Califórnia (EUA), está em operação desde 2008 e é um exemplo de sistema de RPI por espalhamento, empregando

o que há de mais recente das tecnologias avançadas de tratamento. A água resultante da mistura da água de reúso e a água subterrânea servem como fonte de abastecimento de água para a região (ANGELAKIS et al., 2018).

O RPI por recarga de aquífero por injeção é uma estratégia que envolve a injeção direta de água de reúso nos aquíferos subterrâneos, visando recarregá-los e, posteriormente, recuperar essa água para uso potável. Este processo combina as etapas de tratamento avançado da água com a reinjeção controlada e monitorada no solo, promovendo a recarga sustentável dos aquíferos (SANTOS et al., 2020).

Na Austrália, a cidade de Perth implementou com sucesso o reúso potável indireto por recarga de aquífero por injeção. Este projeto envolve a injeção de água tratada em aquíferos profundos, ajudando a garantir a segurança hídrica em áreas propensas à escassez de água (SANTOS et al., 2022).

O reúso potável indireto superficial refere-se à prática de liberar água de reúso em corpos d'água superficiais, como rios ou lagos, e, posteriormente, capturar e tratar essa água novamente para uso potável. Essa abordagem busca otimizar a diluição natural e a autodepuração dos corpos d'água, proporcionando uma barreira física entre a liberação da água tratada e o ponto de captação para o abastecimento público. A cidade de Singapura é um exemplo destacado de reúso potável indireto superficial. O Projeto NEWater consiste na purificação avançada de água residual, seguida pela sua liberação em reservatórios e rios. Posteriormente, essa água é coletada, tratada novamente por meio de processos convencionais e avançados, e reintroduzida na rede de abastecimento público (GERRITY et al., 2018).

2.2.3. Reúso Potável Indireto Não Planejado

O reúso potável indireto não planejado não é adequado e nem deve ser considerado como uma modalidade de reúso potável. No entanto, a sua existência é real e é mais prevalente em contextos de países em desenvolvimento. Nesse cenário, as águas residuais, muitas vezes sem tratamento adequado, são lançadas em corpos hídricos sem uma estrutura planejada para recaptura. Essa água, então, é inadvertidamente reutilizada para abastecimento, embora sem os benefícios dos controles de qualidade e segurança oferecidos pelos métodos planejados (ANGELAKIS et al., 2018).

Em síntese, o reúso potável de água representa uma abordagem crucial para enfrentar as demandas crescentes em um mundo onde a escassez de água se torna uma realidade cada vez mais evidente. Compreender as nuances dessas modalidades é essencial para implementar

políticas eficazes e garantir a segurança e aceitação dessa prática transformadora (MOURA et al., 2020).

A problemática do descarte inadequado de águas residuais é alarmante, estimando-se que mais de 80% desses efluentes sejam despejados no meio ambiente globalmente, atingindo uma proporção ainda mais preocupante, ultrapassando 95%, em alguns países em desenvolvimento (SILVA, 2018).

Em diversos cenários, a água de reúso torna-se uma componente substancial do fluxo total em vários corpos d'água receptores, ilustrando uma realidade ambiental e hídrica complexa. Exemplos notáveis dessa ocorrência incluem rios como o Santa Ana, no sul da Califórnia; o Platte, a jusante de Denver, Colorado; o Ohio, próximo à cidade de Cincinnati, Ohio; além da Bacia Hidrográfica de Occoquan, situada a sudoeste de Washington, DC, e diversos rios proeminentes na Europa (HESPANHOL, 2015).

Em algumas estações de tratamento de água, especialmente em situações de baixo fluxo, uma parcela substancial, podendo alcançar até 75%, é composta pelo efluente de águas residuais proveniente de comunidades localizadas a montante. À medida que a população mundial continua a crescer e a pressão sobre os recursos hídricos intensifica-se, a compreensão profunda da extensão e das implicações do reúso potável não planejado torna-se vital no planejamento e operação eficazes de estações de tratamento de água. Esse entendimento torna-se especialmente relevante para garantir a proteção da saúde da população, conforme ressaltado pelos estudos de Angelakis et al. (2018).

Para além dos despejos diretos em rios, diversos registros indicam que a utilização de águas residuais não tratadas em terras agrícolas tem resultados na recarga não planejada de aquíferos. Esses aquíferos, por sua vez, são fontes subsequentemente exploradas para o consumo humano. Exemplos dessas práticas documentados incluem o Egito, México, Peru e Tailândia. No México, uma quantidade expressiva de águas residuais da Cidade do México é despejada no árido Vale de Tula, também conhecido como Vale do Mezquital, onde cerca de 500.000 habitantes são abastecidos com água proveniente desse processo, conforme revelado por Drewes et al. (2017). Esses casos destacam a urgência em avaliar e gerenciar eficientemente o reúso não planejado de águas residuais, reconhecendo as complexidades e os impactos associados a essa prática em diversas regiões do mundo.

2.3. Aspectos legais

A trajetória regulatória do reúso a nível global teve sua gênese em 1918, quando o estado da Califórnia, nos Estados Unidos da América, pioneiramente promulgou seus primeiros padrões regulatórios. Essas normas contemplavam a aplicação de efluentes tratados em culturas não destinadas ao consumo *in natura*, destacando-se, na época, a viabilidade dessa prática em virtude das propriedades de fertirrigação do esgoto (ANGELAKIS et al., 2018; SHOUSHARIAN; NEGAHBAN-AZAR, 2020).

O marco regulatório internacional ganhou impulso em 1973, quando a Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou suas primeiras diretrizes relacionadas ao reúso de água para irrigação. Essa iniciativa foi seguida por diversos países, convergindo esforços na promoção de práticas seguras de reúso (Shoushtarian; Negahban-Azar, 2020). Em 1999, a OMS incorporou, pela primeira vez, o conceito de segurança do abastecimento de água em seus Planos de Segurança da Água, adotando uma abordagem baseada no risco com o objetivo de controlar doenças de veiculação hídrica. No ano de 2006, a OMS estabeleceu diretrizes específicas para o reúso de água na agricultura, consolidando uma visão normativa abrangente (WHO, 2006). O avanço da ciência e da avaliação de riscos culminou, em 2017, em a OMS apresentar um guia para a produção de água potável a partir do reúso (WHO, 2017).

A evolução temporal dessas regulamentações reflete o contínuo aprimoramento da compreensão científica e normativa em relação ao reúso de água, reforçando a importância de uma abordagem abrangente e baseada em evidências para garantir a segurança hídrica e a saúde pública.

De acordo com Santos, et al. (2021) no caso da prática geral de reúso de água, o Brasil apresenta somente a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) nº 54/2005 que aborda diferentes modalidades de reúso não potável de água, mas não define padrões de qualidade de água. No nível subfederal, o reúso de água não potável é estabelecido com a definição de padrões de qualidade de água somente nos estados da Bahia, de São Paulo, do Ceará, de Minas Gerais e do Rio Grande do Sul (SANTOS & LIMA, 2022). Mais recentemente, foram ainda incorporados os estados do Paraná e do Mato Grosso do Sul.

No entanto, a falta de uma regulamentação federal (ou até mesmo subfederal) específica para o reúso potável representa um desafio, deixando lacunas significativas na abordagem dessa prática em todo o país.

Internacionalmente, países como Austrália e Estados Unidos já estabeleceram legislações abrangentes sobre o reúso potável, oferecendo modelos que poderiam inspirar o desenvolvimento de regulamentações mais completas e adaptadas à realidade brasileira. A busca por uma regulamentação mais consistente e alinhada com as necessidades locais emerge

como um desafio e uma necessidade premente para promover efetivamente o reúso potável de água no Brasil.

2.4. Poluentes de preocupação emergente

Os micropoluentes emergentes representam uma categoria de substâncias químicas que têm ganhado destaque devido ao seu impacto crescente na qualidade da água. Estes compostos, muitas vezes presentes em concentrações baixas, são considerados emergentes devido à sua detecção mais recente e ao aumento do conhecimento sobre seus efeitos no meio ambiente e na saúde humana (USEPA, 2010).

Entre os micropoluentes emergentes, incluem-se fármacos, produtos de higiene pessoal, pesticidas, hormônios e compostos industriais. Essas substâncias, uma vez introduzidas nos corpos d'água, podem persistir e se acumular, resultando em possíveis efeitos adversos.

O aumento do uso de produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais contribui para a presença desses micropoluentes na água, sendo detectados em níveis baixos em diversas matrizes ambientais. Esses compostos suscitam preocupações sobre seus potenciais impactos na saúde humana e no meio ambiente, especialmente quando sua presença compromete a qualidade da água destinada ao consumo humano (USEPA, 2014).

A regulação e monitoramento desses micropoluentes emergentes representam um desafio significativo para os órgãos ambientais. Estratégias integradas de gestão da água, tratamento avançado de efluentes e uma abordagem mais ampla de gestão de resíduos são essenciais para mitigar a presença desses contaminantes emergentes e proteger efetivamente nossos recursos hídricos. A pesquisa contínua e a conscientização são cruciais para entender melhor esses micropoluentes e desenvolver abordagens eficazes para preservar a qualidade da água no presente e no futuro (HEIDARI et al., 2023).

No contexto brasileiro, a regulamentação específica para micropoluentes ainda está em estágio inicial. A legislação ambiental existente, como por exemplo a Resolução CONAMA nº 357/2005, estabelece padrões de qualidade de água para os diferentes usos da água superficial, mas a abordagem detalhada sobre micropoluentes é limitada. No entanto, a crescente conscientização sobre esses contaminantes tem impulsionado discussões sobre a necessidade de normativas mais específicas.

O país enfrenta o desafio de mapear e monitorar a presença de micropoluentes em seus corpos d'água, bem como de estabelecer limites seguros para essas substâncias. Iniciativas

científicas e avanços na compreensão dos impactos desses contaminantes podem influenciar o desenvolvimento de documentos regulatórios mais precisos no futuro.

A regulamentação de micropoluentes varia consideravelmente entre os países. Em alguns lugares, como a União Europeia (UE), foram implementadas medidas mais abrangentes para monitorar e controlar esses contaminantes. A UE estabeleceu a Estratégia de Poluentes Químicos da Água, que visa identificar e reduzir a presença de substâncias químicas perigosas, incluindo micropoluentes, nos corpos d'água (WHO, 2017).

Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) identifica e monitora micropoluentes. Em outros países, como Canadá e Austrália, diferentes abordagens e padrões foram adotados, destacando a complexidade global na regulamentação desses contaminantes emergentes (USEPA, 2017). A EPA está iniciando o desenvolvimento da Sexta Lista de Candidatos a Contaminantes (CCL 6). O CCL é uma lista de contaminantes que atualmente não estão sujeitos a nenhuma regulamentação nacional de água potável primária proposta ou promulgada, mas cuja ocorrência é conhecida ou prevista em sistemas públicos de água. Os contaminantes listados no CCL podem exigir regulamentação futura sob a Lei da Água Potável Segura (USEPA, 2023).

A cooperação internacional é essencial para abordar efetivamente o desafio dos micropoluentes. Compartilhar conhecimentos e melhores práticas, além de estabelecer padrões internacionais pode fornecer uma base sólida para enfrentar esse problema global. À medida que a pesquisa científica avança e a conscientização aumenta, é provável que haja um impulso para regulamentações mais robustas em todo o mundo, visando a proteção da qualidade da água e a preservação dos ecossistemas aquáticos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho aborda os aspectos legais e práticos do reúso potável de água no mundo, buscando identificar os principais micropoluentes de ocorrência nacional e indicar padrões protetivos que poderiam nortear o reúso potável direto e indireto no Brasil. Para tal, foram desenvolvidos quatro Trabalhos Técnico-Científicos (TTC), todos publicados (ou submetidos, ou em elaboração) em revistas científicas e congressos científicos, envolvendo a totalidade dos aspectos envolvidos na condução do estudo. Os TTC mencionados estão apresentados nos Apêndices A ao Apêndice E desta dissertação e descritos no Quadro 1. Conforme pode-se observar, os dois primeiros (TTC 1 e 2) estão relacionados ao entendimento da regulamentação dos micropoluentes na prática de reúso potável no mundo. Já os TTC 3 e 4 são focados na realidade brasileira.

Quadro 1 - Trabalhos técnicos-científicos elaborados no âmbito desta dissertação para o desenvolvimento do estudo de micropoluentes visando a definição de padrões de reúso potável de água

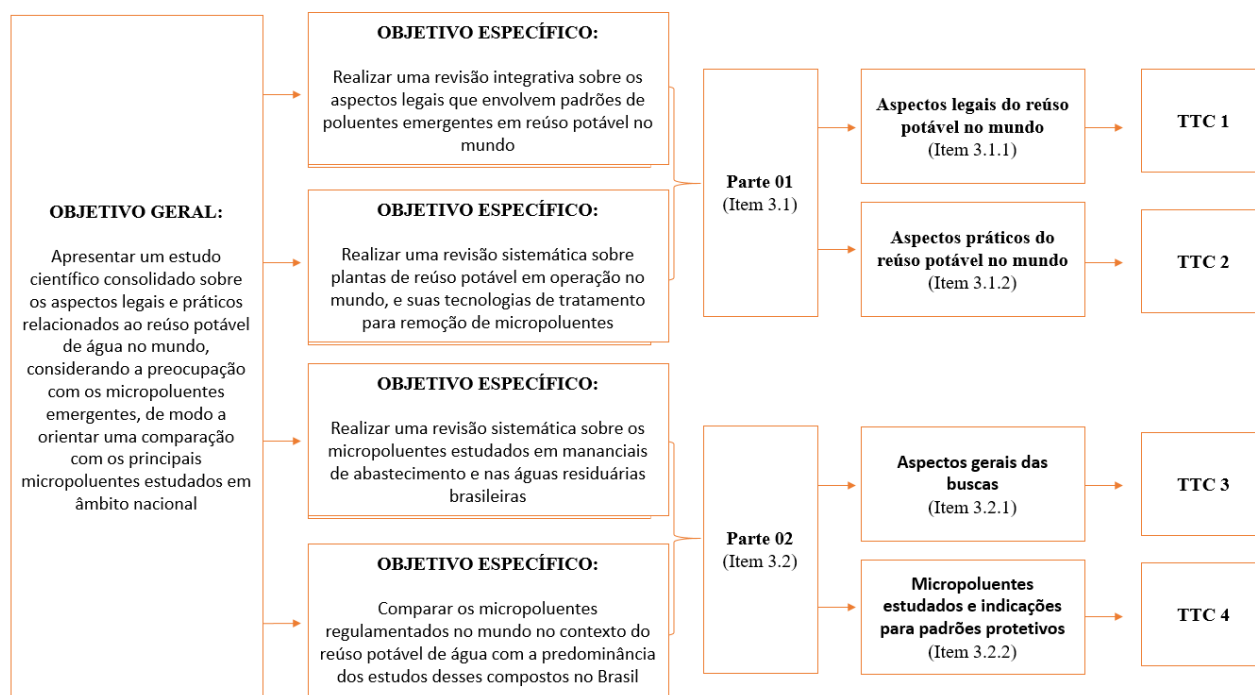
Trabalhos Técnicos-científicos					
Sigla	Título	Publicação	Ano	Autores	Status da Publicação
TTC 1	A regulamentação dos poluentes emergentes no contexto internacional do reúso potável de água	32º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental	2023	Mickaela Midon da Paixão , Ana Silvia Pereira Santos, Renata de Oliveira Pereira	Publicado em anais
TTC 2	Review on legal and practical aspects related to micropollutants in potable reuse	International Journal of Environmental Science and Technology	2023	Mickaela Midon da Paixão , Renata de Oliveira Pereira, Ana Silvia Pereira Santos	Submetido. Está em revisão
TTC 3	Levantamento qualitativo sobre ocorrência de micropoluentes em matrizes aquosas brasileiras	Silubesa - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental	2024	Mickaela Midon da Paixão , Renata de Oliveira Pereira, Ana Silvia Pereira Santos	Submetido
TTC 4	Trabalho técnico	Em parceria com empresas já contactadas previamente	2024	Mickaela Midon da Paixão , Renata de Oliveira Pereira, Ana Silvia Pereira Santos	Em elaboração

Fonte: A autora

Com o objetivo de abordar os dois dos principais desafios relacionados ao reúso potável de água (regulamentação e micropoluentes), o presente estudo foi conduzido em duas partes, ao longo de 20 meses (março de 2022 a novembro de 2023): A **Parte 1** caracteriza o levantamento de informações sobre reúso potável de água e a regulamentação de micropoluentes no mundo. E, a **Parte 2** envolve o levantamento do cenário brasileiro para nortear a busca de padrões protetivos para os micropoluentes emergentes no contexto do reúso potável de água.

Na Figura 7 pode ser observado o detalhamento do desenvolvimento da metodologia para o alcance do objetivo geral e dos objetivos específicos, compreendendo duas partes metodológicas que envolvem dois segmentos, cada uma, contemplando também os TTC produzidos.

Figura 7 - Correlação dos TTC desenvolvidos com as Etapas 1 e 2 da metodologia e, consequentemente, com o Objetivo geral e os objetivos específicos



Legenda: TTC: Trabalhos Técnico-Científicos.

Fonte: A autora

3.1. Parte 1 – Aspectos legais e práticos do reúso potável de água no mundo

As atividades da Parte 1 da metodologia foram divididas de acordo com a Figura 8, em que constam uma revisão integrativa sobre os aspectos legais e uma revisão sistemática sobre as plantas de reúso potável em operação no mundo.

Figura 8 - Metodologia da Parte 1



Fonte: A autora

3.1.1. Aspectos legais do reúso potável no mundo (TTC1)

Para esta etapa, foi conduzida a revisão integrativa da literatura com o intuito de integrar os documentos reguladores de reúso potável de água, a nível global, delineando padrões de qualidade para os principais micropoluentes.

Para essa análise, utilizou-se o método de busca de artigos científicos por meio da base de dados do Google Acadêmico – O Google Acadêmico abrange importantes bases de dados científicas internacionais e é uma ferramenta de busca amplamente utilizada na comunidade acadêmica (CANTO et al., 2023), considerando um período de 2018 a 30 de setembro de 2023.

Foi realizada a triagem dos artigos selecionados, considerando: 1) títulos e resumos relacionados aos aspectos regulatórios sobre micropoluentes no reúso de água potável, 2) identificação dos países/regiões citados nos artigos selecionados que atualmente regulamentam o reúso de água potável no mundo, por meio de uma leitura completa dos artigos escolhidos.

A partir disso iniciou-se a busca dos documentos regulatórios oficiais ou orientadores de cada região que consideram padrões de controle para micropoluentes em casos de reúso potável de água.

A partir do recorte metodológico apresentado, foi possível compreender o cenário regulatório atual do reúso de água potável no mundo. Após a leitura dos artigos, foi criada uma lista de países/regiões que regulamentam a prática, tanto diretamente quanto indiretamente. Além da abordagem legal, foram identificados documentos de orientação de instituições internacionais que apresentam diretrizes e critérios para o mesmo propósito, mas sem efeito legal. Completando a seleção inicial, foram incluídos outros documentos regulatórios que não foram mencionados nos artigos selecionados, mas que eram previamente conhecidos pela pesquisadora e suas orientadoras.

É importante destacar que em todo o mundo, o reúso de água tem sido regulamentado desde 1918 e muitos países já o praticam. No entanto, a aplicação mais comum é para fins de irrigação agrícola, incluindo documentos legais já consolidados (SANTOS et al., 2022), mas que geralmente não abordam micropoluentes de preocupação emergente. O foco deste trabalho é o reúso potável e documentos regulatórios/orientadores que envolvem micropoluentes.

Para elaborar o conteúdo da discussão, as seguintes informações foram extraídas dos documentos selecionados:

- Ano de publicação do documento;
- Tipo de documento (obrigatório ou não);
- Tipo de prática regulamentada (reúso direto, reúso indireto ou ambos);

- Existência ou ausência de regulamentação/orientação para micropoluentes;
- Fundamento para a regulamentação: saúde ou eficiência, além da metodologia de cálculo; e
- Valor orientador ou valor máximo permitido do poluente emergente.

3.1.2. Aspectos práticos do reúso potável no mundo (TTC 2)

Para esta etapa, foi conduzida a revisão sistemática da literatura iniciada pela busca por artigos científicos nas bases de dados do Google Acadêmico e Scopus, considerando um intervalo de tempo de 2018 a 30 de setembro de 2023. Foi então realizada uma triagem dos artigos selecionados, levando em consideração títulos e resumos relacionados ao tema de pesquisa, que trata de plantas de reúso de água potável em operação em todo o mundo.

A partir disso foi realizada a seleção de artigos que continham em seu texto informações sobre plantas de reúso em operação, tais como localização, tecnologias de tratamento e ano de implementação. A identificação de plantas de reúso potável de água atualmente em operação no mundo foi realizada por meio de uma leitura completa dos artigos selecionados.

As seguintes informações foram extraídas dos artigos selecionados para a construção do conteúdo da discussão do trabalho:

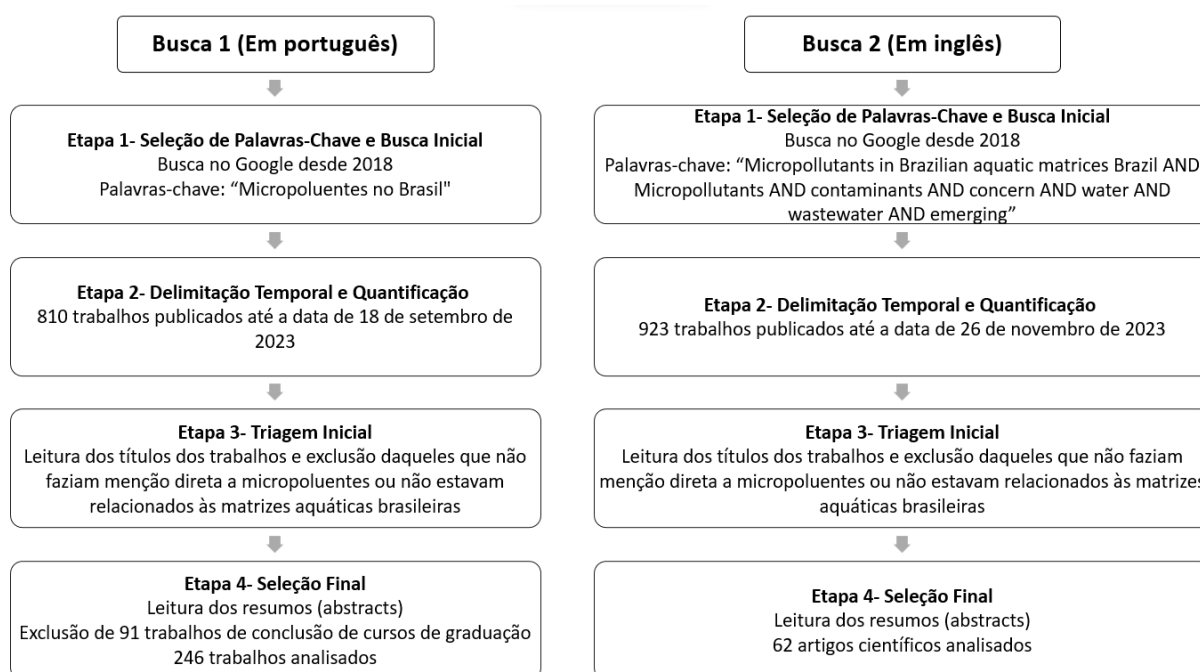
- Localização da planta;
- Tipo de reúso;
- Taxa de fluxo (Vazão);
- Data de início de operação; e
- Tipo de tratamento utilizado.

3.2. Parte 2 – Micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras (TTC3)

A metodologia utilizada para a elaboração da Parte 2 da pesquisa envolveu duas buscas sistemáticas da literatura com o objetivo de identificar e analisar estudos relacionados aos micropoluentes em matrizes aquáticas brasileiras, com enfoque no período de 2018 a novembro de 2023. O processo metodológico da Parte 2 foi dividido nas etapas 1 a 4 que incluíram a seleção de palavras-chave, a delimitação temporal da busca, a triagem dos trabalhos encontrados e a seleção final dos trabalhos alvo da pesquisa. Foi realizada uma busca em português (busca 1) e uma busca em inglês (busca 2) a fim de coletar os resultados de produções

acadêmicas e publicações científicas nacionais e internacionais. A figura 9 mostra a metodologia aplicada.

Figura 9 - Metodologia da Parte 2



Fonte: A autora

3.2.1. Aspectos gerais das buscas

De maneira geral, utilizou-se o Google Acadêmico como ferramenta de pesquisa, com a definição de palavras-chave adequadas (Etapa 1), de forma a encontrar os trabalhos científicos mais relevantes sobre os estudos relacionados aos micropoluentes emergentes nas matrizes aquosas brasileiras. Para tal, foram usadas as seguintes palavras-chave tanto na busca 1 (em inglês) como na busca 2 (em português).

- Busca 1: Micropoluentes no Brasil
- Busca 2: *Micropollutants in Brazilian aquatic matrices Brazil AND Micropollutants AND contaminants AND concern AND water AND wastewater AND emerging*

Ambas as buscas foram refinadas a cada ano, permitindo verificar o número de trabalhos publicados anualmente no período de 2018 a 2023 (Etapa 2). Isso visou a obtenção de um panorama geral sobre a produção acadêmica relacionada ao tema no Brasil.

Na triagem inicial (Etapa 3), foram lidos os títulos dos trabalhos e excluídos aqueles que não faziam menção direta aos micropoluentes e/ou não estavam relacionados às matrizes aquáticas brasileiras. Isso permitiu identificar o volume de pesquisas recentes relacionadas aos micropoluentes em matrizes aquáticas essencialmente brasileiras. Adicionalmente, os trabalhos de graduação foram descartados visto que, geralmente, não apresentam rigor científico para as análises do presente trabalho. Destaca-se que na busca 2, foi realizada uma verificação para que os trabalhos encontrados na busca 2 não estivessem presentes na busca 1.

Para a seleção final (Etapa 4), a partir da etapa anterior, realizou-se a leitura dos resumos (*abstracts*) ou resumos estendidos, quando disponíveis. Neste caso, excluíram-se os trabalhos que não abordavam o tema de micropoluentes em matrizes aquáticas brasileiras ou que não apresentavam relevância para a pesquisa. Assim, os trabalhos selecionados nas buscas 1 e 2, (oriundos de dissertações de mestrado, teses de doutorado ou artigos científicos) foram submetidos a uma análise aprofundada para: 1) identificação do nome dos micropoluentes de forma qualitativa, 2) do estado onde foi realizado o estudo, e 3) em qual matriz (água e esgoto) o poluente foi avaliado. Isso permitiu identificar as tendências de pesquisa sobre o tema, no contexto brasileiro.

3.2.2. Micropoluentes estudados e indicações para padrões protetivos

Após o levantamento de todos os trabalhos, realizou-se uma análise qualitativa para conhecimento dos micropoluentes mais estudados e sua divisão de acordo com suas classes. Com base nessa relação, buscaram-se os trabalhos que apresentavam informações quantitativas sobre a presença e concentrações desses compostos nas matrizes aquáticas brasileiras.

Conforme já mencionado, a presença de micropoluentes emergentes em matrizes aquosas e as suas concentrações variam substancialmente em cada região do mundo. Assim, a Parte 1 da pesquisa orientou o entendimento geral sobre padrões para diferentes micropoluentes em documentos reguladores para reúso potável no mundo. Por outro lado, e de maneira complementar, a Parte 2 foi essencial para relacionar este entendimento geral sobre os micropoluentes regulamentados no mundo, com o conteúdo específico que abrange as características brasileiras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Parte 1 – Aspectos legais e práticos do reúso potável de água no mundo

4.1.1. Aspectos legais do reúso potável no mundo (TTC1)

Como resultado da revisão integrativa, inicialmente foram encontrados 110 artigos, conforme descrito na metodologia. Contudo, apenas 16 artigos científicos que continham informações precisas sobre aspectos legais foram selecionados. Com essa etapa, foi possível obter uma compreensão geral do cenário internacional em relação à regulamentação do reúso de água potável e selecionar os documentos legais internacionais de interesse no tema. Como resultado, uma lista de 19 documentos orientativos e/ou regulatórios sobre o reúso de água potável no mundo foi elaborada. Dentre eles, apenas 6 adotam padrões de controle para micropoluentes.

A Tabela 1 apresenta os 19 documentos resultantes da revisão da literatura, considerando o ano de publicação, indicação para reúso potável direto (RPD) ou reúso potável indireto (RPI), e a definição ou não de padrões para o controle de micropoluentes. Todos eles são classificados como “Orientação” quando o documento não tem valor legal, ou “Lei” quando o documento está relacionado a atos legislativos.

Tabela 1 - Documentos regulatórios (diretiva ou lei) sobre reúso potável (direto ou indireto) no mundo e a definição de padrões para o controle de micropoluentes.

Ano de Publicação	Região	Tipo de documento	RPI	RPD	Padrões para micropoluentes
1968	Namíbia	Diretriz e lei	Não	Sim	Não
2001	New Mexico (USA)	Lei	Sim	Não	Não
2008	Australia	Diretriz e lei	Sim	Não	Sim
2008	Virginia (USA)	Lei	Sim	Não	Não
2009	Massachusetts (USA)	Lei	Sim	Não	Não
2009	Montana (USA)	Lei	Sim	Não	Não
2009	Oregon (USA)	Lei	Sim	Sim	Não
2011	North Carolina (USA)	Lei	Sim	Não	Não
2012	Pennsylvania (USA)	Lei	Sim	Não	Não
2015	Texas (USA)	Diretriz e lei	Sim	Sim	Sim
2015	Water Reuse	Lei	Sim	Sim	Sim
2017	WHO	Lei	Sim	Sim	Sim

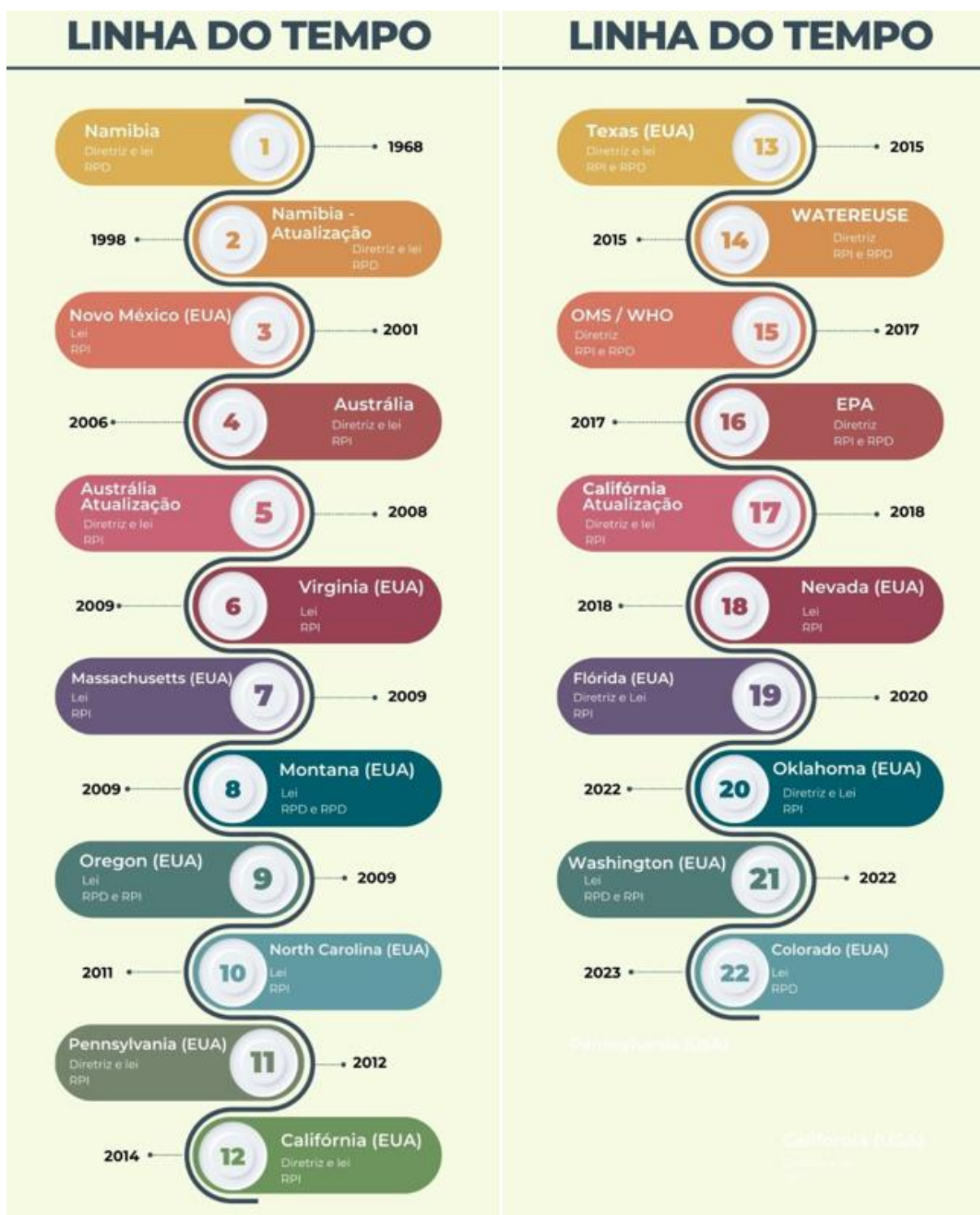
Ano de Publicação	Região	Tipo de documento	RPI	RPD	Padrões para micropoluentes
2017	EPA	Diretriz	Sim	Sim	Não
2018	California (USA)	Diretriz e lei	Sim	Não	Sim
2018	Nevada (USA)	Lei	Sim	Não	Não
2020	Florida (USA)	Diretriz e lei	Sim	Não	Sim
2022	Oklahoma (USA)	Diretriz e lei	Sim	Não	Sim
2022	Washington (USA)	Lei	Sim	Sim	Não
2023	Colorado (USA)	Lei	Não	Sim	Não

Legenda: RPI: reúso potável indireto; RPD: reúso potável direto; OMS: Organização Mundial da Saúde; EPA: Agência de Proteção Ambiental; Associação de Reúso de Água da América.

Fonte: A autora

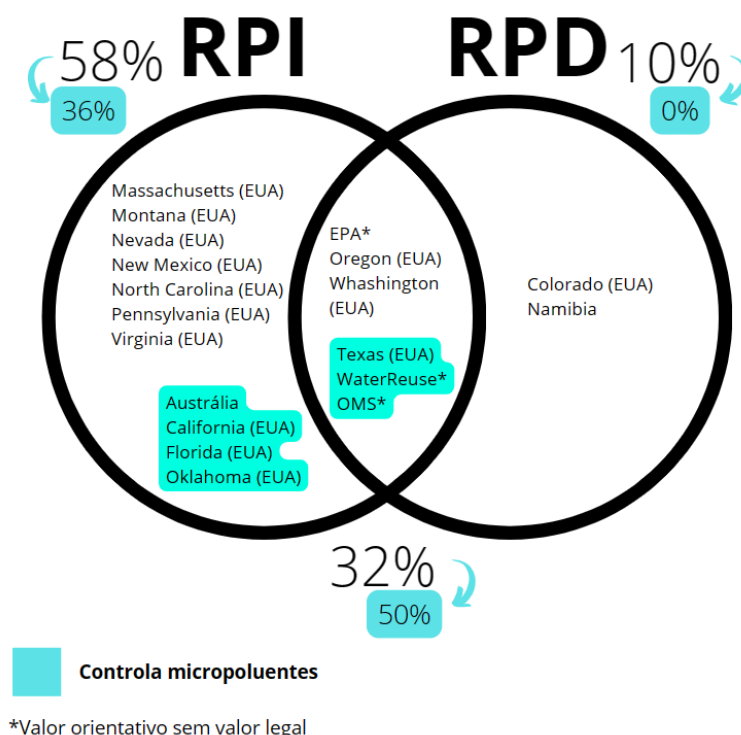
As instituições que publicaram diretrizes para a prática do reúso de água potável são a Organização Mundial da Saúde (OMS), a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e a Associação Americana de Reúso de Água. Essas diretrizes não têm caráter obrigatório; elas apenas sugerem parâmetros de controle e fornecem orientações adicionais para o reúso de água potável. A Figura 10 apresenta uma linha do tempo dos documentos regulatórios (diretiva ou lei) sobre reúso potável (direto ou indireto) no mundo.

Figura 10 – Linha do tempo de regulamentações/diretrizes de reúso potável de água



Dos resultados apresentados na Tabela 1, observa-se uma interação entre as características gerais dos documentos, como os que estabelecem critérios e padrões apenas para RPI, apenas para RPD, ou para ambos; os que controlam ou não os micropoluentes; e os considerados legais ou apenas diretrizes. Essa interação é evidenciada na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama comparativo de regulamentações/diretrizes de acordo com o tipo de reúso potável e controle de micropoluentes



Fonte: A autora

Dos 19 documentos analisados, 3 regulam tanto RPD quanto RPI, além dos documentos de orientação da OMS (2017), WateReuse (2015) e USEPA (2017), que orientam a prática para ambos. Dessas 6 diretrizes que abrangem os 2 tipos de reúso potável, apenas Texas (2015), OMS (2017) e WateReuse (2015) estabelecem padrões para micropoluentes. Um total de 11 documentos são específicos para RPI, todos com poder legislativo. Desses, apenas Califórnia (2018), Austrália (2008), Flórida (2020) e Oklahoma (2022) possuem parâmetros de controle para micropoluentes.

Existem 2 documentos específicos para RPD e nenhum deles estabelece valores para o controle de micropoluentes. O primeiro é a legislação da Namíbia, criada em 1968, época em que havia pouca pesquisa e conhecimento científico sobre poluentes de preocupação emergente, e seus efeitos no sistema endócrino de certas classes desses compostos ainda eram limitados. O segundo é o estado do Colorado nos EUA, que emitiu uma resolução em 2023 autorizando a prática de reúso potável direto de água, mas não estabelece padrões de controle para micropoluentes.

O caso da Namíbia é emblemático devido à implementação da primeira planta de reúso direto de água potável do mundo (Gorengab) em 1968. O Gorengab foi projetado com o objetivo de atender a critérios e diretrizes para água potável, definidos pela OMS em 1963 (OMS, 2017), pois naquela época não havia legislação sobre o assunto.

A Austrália foi o primeiro país a desenvolver Diretrizes Nacionais para reúso potável indireto (2008), com a criação da fase 2 das diretrizes australianas para reúso de água (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2008). O documento inclui valores limite para a concentração de 86 produtos farmacêuticos na água para reúso.

Os Estados Unidos não têm legislação federal sobre reúso de água potável; o país segue as diretrizes da USEPA (2012) e seu compêndio USEPA (2017). A agência destaca em seus documentos a importância do controle e monitoramento de micropoluentes, evidenciando o risco à saúde desses compostos no RPD. O documento cita as pesquisas e diretrizes utilizadas para formular a legislação na Austrália e na Califórnia. No entanto, a agência em si não estipula valores de controle para tais compostos. Ainda, 14 dos 50 estados dos EUA já regulamentaram a prática para reúso potável direto e/ou indireto. Oregon foi o primeiro estado a regulamentar o reúso potável direto, em 2009, mas nesse caso, não indica padrões para micropoluentes. Rigueto (2021) mostra que o tema ganhou expressividade em 2016.

O estado do Texas, e as instituições WateReuse e OMS são as únicas (entre as consultadas) que estabelecem limites para micropoluentes (reúso direto e indireto). A OMS destacou-se com 67 compostos, dos quais 19 são produtos químicos industriais e 32 são pesticidas, deixando clara sua preocupação com o controle de pesticidas. No Texas, dos 19 compostos, os 4 produtos farmacêuticos e 3 aditivos alimentares tornam esses grupos os mais recorrentes. Finalmente, a WateReuse destacou a classe de produtos farmacêuticos com 7 dos 17 listados.

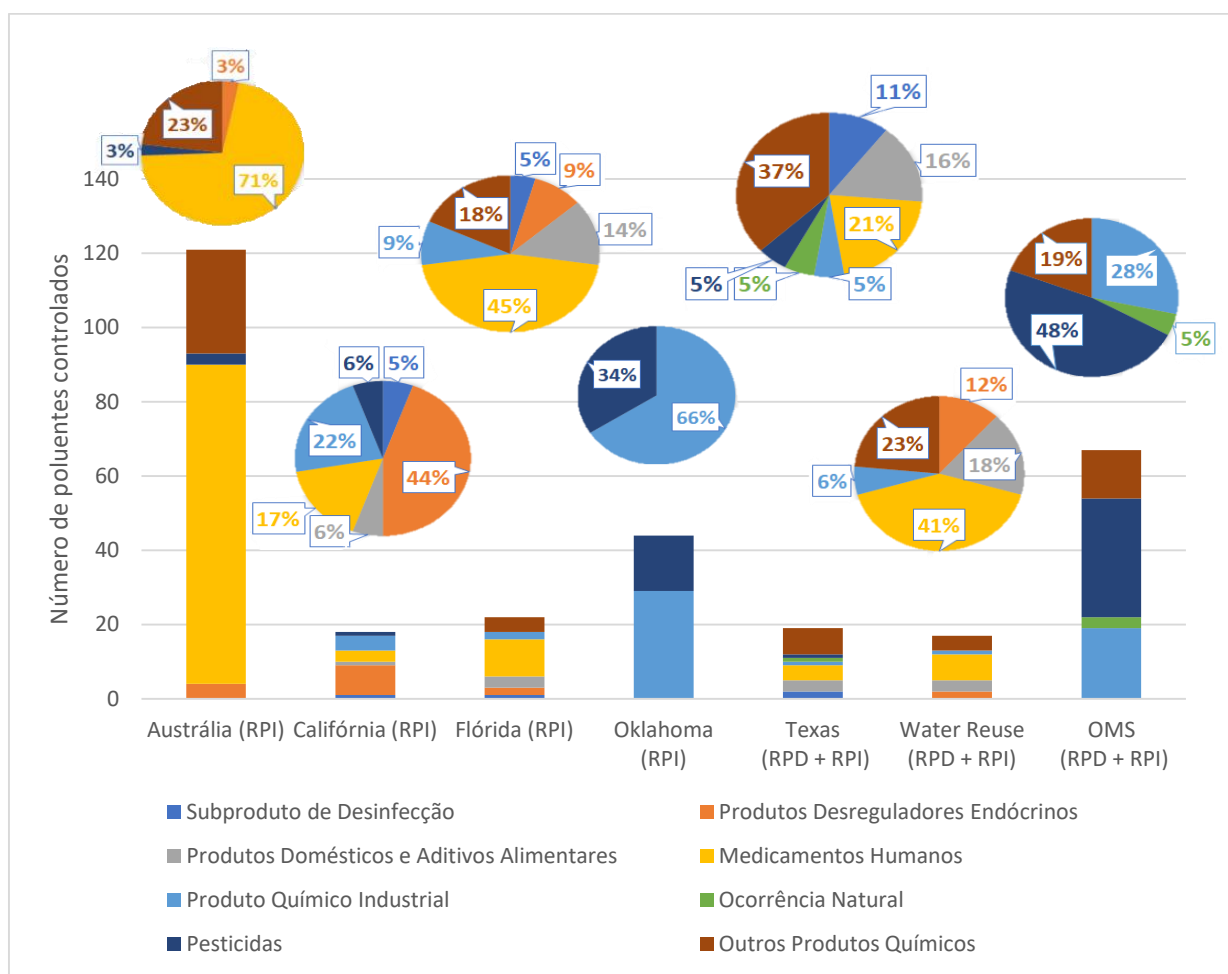
Os estados da Califórnia e da Flórida, assim como a Austrália, estabelecem padrões para micropoluentes apenas para o reúso potável indireto. A Austrália se destacou com o maior número de compostos controlados (121); 86 são produtos farmacêuticos, evidenciando a preocupação com seus efeitos. Oklahoma regulamenta 29 compostos químicos industriais de um total de 44. A Flórida possui 10 dos 22 compostos como produtos farmacêuticos. Na Califórnia, dos 18 compostos, 8 são desreguladores endócrinos, tornando esse o grupo com maior presença.

O comportamento desses compostos pode variar em diferentes climas. Em climas mais quentes e secos, por exemplo, a evaporação pode causar uma concentração mais elevada de micropoluentes em corpos d'água, enquanto em climas mais frios, a neve pode atuar como reservatório para esses compostos, liberando-os gradualmente na água à medida que a neve derrete. Além disso, a presença de micropoluentes na água pode ser afetada pela quantidade de chuva, diluição e outros fatores climáticos. Portanto, é importante compreender como os micropoluentes se comportam em diferentes climas para tomar medidas eficazes para evitar sua contaminação da água (WANG et al., 2016).

Além da questão climática, as especificidades nas regulamentações de produtos farmacêuticos e pesticidas podem variar significativamente de país para país. Alguns países podem ter preferência por determinados medicamentos, enquanto outros podem ter restrições ou proibições ao uso desses mesmos medicamentos. Da mesma forma, alguns países permitem o uso de certos pesticidas que são proibidos em outras partes do mundo. Essas diferenças podem ser devidas a vários motivos, incluindo diferenças na legislação, condições ambientais e preferências culturais, resultando em diferentes exposições a micropoluentes na água (BOER et al., 2023).

A Figura 12 mostra as quantidades de micropoluentes controlados em cada um dos documentos estudados que estabelecem padrões para esses compostos, por categorias de micropoluentes.

Figura 12 - Categoria de micropoluentes controlados por país/região



Fonte: A autora

A Figura 12 ilustra a ênfase no controle de produtos farmacêuticos, uma das categorias mais fortemente regulamentadas, ao lado dos pesticidas. Esses compostos são amplamente utilizados em diferentes regiões do planeta e, como será mencionado, podem ser removidos efetivamente com o uso de arranjos tecnológicos adequados.

Ao todo, nos 7 documentos analisados, há 248 poluentes de preocupação emergente controlados. Entre eles, 49 são comuns a mais de um documento. O Quadro 2 mostra a lista de compostos controlados em mais de uma regulamentação ou diretriz e faz a distinção entre parâmetros voltados para a proteção da saúde humana e eficiência de tratamento.

Vale ressaltar que a única regulamentação para reúso potável direto que controla micropoluentes é a regulamentação do Texas, uma vez que WaterReuse e a OMS são apenas diretrizes, sem caráter legal. Todas as outras regulamentações são para reúso potável indireto.

Quadro 2 - Parâmetros de micropoluentes controlados em mais de uma regulamentação/diretriz

Composto	OMS (RPD+RPI)	Califórnia (RPI)	Austrália (RPI)	Texas (RPD+RPI)	Flórida (RPI)	Oklahoma (RPI)	Water Reuse (RPD+RPI)
	Limite (µg/L)						
1,2-Dibromo-3-chloropropane	1					0.2	
1,2-Dichloroethane	30					5	
1,2-Dichloropropane	40					5	
1,4-Dioxane	50	0.1		0.032	0.1		1
17-β-estradiol			0.175	0.001	Limite de detecção		Limite de detecção
2,4,5-TP (Silvex)	9					50	
2,4-D	30					70	
Alachlor	20					2	
Atenolol				0.063	4		4
Atrazine	100					3	
Benzene	10					5	
Benzo(a)pyrene (PAHs)	0.7					0.2	
Bisphenol A		0.0005	200				
Caffeine			0.35	0.35			
Carbamazepine			100		10		10
Carbofuran	7					40	
Carbon Tetrachloride	4					5	
Cotinine			10		1		1
Di(2-ethylhexyl)phthalate	8					6	
Dichloromethane	20					5	
Dioxin *		0.0005	0.14				
Estradiol		0.0005	0.175				

Composto	OMS (RPD+RPI)	Califórnia (RPI)	Austrália (RPI)	Texas (RPD+RPI)	Flórida (RPI)	Oklahoma (RPI)	Water Reuse (RPD+RPI)
	Limite (µg/L)						
Estrone			0.03		0.32		0.32
Ethinyl estradiol					Limite de detecção		Limite de detecção
Ethylbenzene	300					700	
Gemfibrozil		0.01	600	0.894	0.01		
Iohexol		0.05	720		0.05		
Meprobamate				0.447	200		200
N,N-diethyl-metatoluamide				0.447	200		200
N-Nitrosodimethylamine (NDMA)	0.1	0.002			0.002		
N-Nitrosomorpholine (NMOR)		0.002	0.001		0.002		
Nonylphenol		0.0005	500				
Pentachlorophenol	9					1	
Perchlorate				0.122	6/15		6/15
Perfluorooctane sulfonate (PFOS)		0.0065		0.014	0.2		0.2
Perfluorooctanoic acid (PFOA)		0.007		0.02	0.4		0.4
Phenyltoin					2		2
Primidone				0.1	10		10
Simazine	2					4	
Styrene	20					100	
Sucralose		0.1		1.247	0.1		0.000015
Sulfamethoxazole		0.01	35		0.01		
TCEP – Tris (2-chloroethyl) phosphate			1	0.071			
Toluene	700					1000	
Triclosan			0.35	1.449	2100		2100

Composto	OMS (RPD+RPI)	Califórnia (RPI)	Austrália (RPI)	Texas (RPD+RPI)	Flórida (RPI)	Oklahoma (RPI)	Water Reuse (RPD+RPI)
	Limite (µg/L)						
Tris (2-Carboxyethyl) phosphine) hydrochloride					5		5
Vinyl chloride	0.3					2	
Xylenes	500					10000	
Performance							

¹ A Austrália utiliza um valor máximo para a soma de todos os compostos de dioxina, enquanto a Califórnia restringe apenas as dibenzo-p-dioxinas policloradas.

² Xilenos em Oklahoma representam o valor total para a classe.

* 2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl (PCB156) 2,3,3',4,4'-pentachlorobiphenyl (PCB105) 2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl (PCB118) 2,4,5,3',4',5'-Hexachlorobiphenyl (PCB167) 2,7-Dichlorodibenzo-p-dioxin (DCDD) 3,4,5,3',4',5'-Hexachlorobiphenyl (PCB169) Octachlorodibenzo-p-dioxin (OCDD)

Fonte: A autora

Dos 49 compostos apresentados no Quadro 2, 16 são utilizados como parâmetro de eficiência e 33 são usados exclusivamente como parâmetro visando proteger a saúde humana. O composto perclorato possui dois valores de controle (6 µg/L e 15 µg/L), tanto no Water Reuse quanto na Flórida, pois um deles segue a metodologia de cálculo utilizada pelo estado da Califórnia (6 µg/L), que é obtido por meio de avaliação de risco baseada em toxicidade e exposição humana. O outro valor (15 µg/L) segue o modelo adotado pela USEPA na elaboração de sua lista de contaminantes emergentes para água potável, não sendo específico para reúso potável, o que explica a diferença entre os valores.

A regulamentação de micropoluentes criada pelo estado da Flórida em 2020 foi baseada nos padrões indicados pelo Water Reuse em 2015. Ao analisar o Quadro 2, também é possível observar que o estado do Texas possui parâmetros pró-saúde mais restritivos quando comparado aos outros documentos, o que é consistente com o fato de ser o único a regular micropoluentes para reúso potável direto.

O estado de Oklahoma em 2022 baseou-se na lista de contaminantes da OMS, mas ao definir seus parâmetros de controle, o estado utilizou o mesmo método que a Austrália usa, com base na dose terapêutica mínima, que é a menor dose de um composto capaz de produzir o efeito desejado. Os três documentos são os únicos a não utilizar parâmetros de eficiência, apenas pró-saúde.

Não é possível afirmar que uma legislação de reúso potável é mais restritiva que outra, pois essas regulamentações frequentemente controlam compostos diferentes. Cada legislação é desenvolvida considerando os desafios e riscos específicos da região. Além disso, mesmo quando se trata de compostos comuns, não é possível estabelecer uma correlação direta entre as restrições impostas. Os critérios de restrição podem variar de acordo com fatores como o contexto local, conhecimento científico disponível, tecnologias de tratamento empregadas e considerações de saúde pública. Portanto, é essencial avaliar a legislação de reúso potável como um todo, considerando os compostos controlados e as metas estabelecidas em cada caso específico.

Outra informação importante que pode ser extraída do Quadro 2 são os sete contaminantes mais recorrentes: 1,4-dioxano, 17-β-estradiol, gemfibrozil, perfluorooctano sulfonato (PFOS), ácido erfluorooctanóico (PFOA), sucralose e triclosan. O 1,4-dioxano está presente em 5 dos 7 documentos (controlado exclusivamente como um parâmetro voltado para a proteção da saúde humana).

Segundo a classificação em relação ao câncer da Agência Internacional do Câncer (IARC) de 2024 que classifica compostos de 1 sendo cancerígeno para humanos, à 3 não

classificável quanto à sua carcinogenicidade para humanos, 1,4-dioxan é um composto orgânico classificado como 2B sendo possivelmente cancerígeno para humanos. É um produto químico industrial, é principalmente usado como solvente e estabilizador para outros produtos químicos (OUYANG et al., 2022). Seus efeitos genotóxicos são controversos; de acordo com o estudo de Demir (2022), o composto exerce efeitos tóxicos e genotóxicos em baixas concentrações.

O 17- β -estradiol está presente em 4 dos 7 documentos (controlado exclusivamente como um parâmetro voltado para a proteção da saúde humana). Existem 3 tipos de estrogênios naturais: 17- β -estradiol, estriol e estrona. Entre eles, o 17- β -estradiol é funcionalmente o mais potente, sendo o principal hormônio sexual feminino responsável pelo desenvolvimento e regulação do sistema reprodutivo e características sexuais secundárias (LU et al., 2023). Segundo IARC (2024) é classificado como grupo 1, o 17- β -estradiol tem vários efeitos adversos à saúde humana, que variam com a concentração do composto e a duração da exposição. Seus efeitos mais comuns são: em concentrações elevadas, pode atuar como um disruptor endócrino, interferindo no funcionamento normal do sistema endócrino humano, afetando a regulação hormonal e o equilíbrio hormonal. Pode afetar o sistema reprodutivo humano, interferindo na função hormonal normal, causando distúrbios menstruais, reduzindo a fertilidade e afetando a qualidade do esperma nos homens. A exposição ao 17- β -estradiol durante a gravidez, mesmo em concentrações baixas, pode representar um risco para o desenvolvimento fetal. Pode afetar o sistema endócrino do feto em desenvolvimento e ter efeitos adversos no desenvolvimento sexual e reprodutivo. A presença de 17- β -estradiol na água pode levar a vários efeitos adversos, incluindo alterações no crescimento e desenvolvimento, metabolismo, função imunológica e outros processos regulados por hormônios. Alguns estudos, como os de Jerry et al. (2018) e Song et al. (2022), sugerem que altas concentrações de 17- β -estradiol na água podem estar associadas a um maior risco de desenvolver certos tipos de câncer, como câncer de mama, próstata e ovário. No entanto, são necessárias mais pesquisas para estabelecer uma relação causal direta.

O gemfibrozil está presente em 4 dos 7 documentos (como parâmetro voltado para a proteção da saúde humana e como parâmetro de eficiência). O gemfibrozil é um medicamento utilizado para tratar níveis elevados de colesterol e triglicerídeos no sangue (KAMAL et al., 2023). A persistência do gemfibrozil foi estudada nas águas superficiais do Lago Maracaibo e do reservatório Tule (Venezuela) em condições laboratoriais, e sob a luz solar, o tempo de meia-vida do composto foi de 135 a 305 dias. Embora o tempo de meia-vida possa ser curto em comparação com outros compostos persistentes, para sua classe de medicamentos altamente biodegradáveis, o gemfibrozil é considerado o de maior persistência no ambiente aquático,

sendo utilizado como parâmetro de eficiência (ARAUJO et al., 2011). Segundo IARC (2024) está classificado como grupo 3.

O PFOS está presente em 4 dos 7 documentos (controlado exclusivamente como um parâmetro voltado para a proteção da saúde humana). Trata-se de uma substância orgânica persistente sintética usada em muitos produtos comerciais e industriais, causando impactos adversos severos e generalizados à saúde humana e ao meio ambiente, pois permanece no ambiente por longos períodos e pode se acumular nos tecidos do corpo humano ao longo do tempo (SORN et al., 2023). Além de ser um desregulador endócrino, o PFOS tem sido associado a efeitos tóxicos no fígado humano, como aumento de enzimas hepáticas, hepatomegalia (aumento do tamanho do fígado) e necrose hepática. Na classificação da IARC (2024) o composto é classificado como 2B possivelmente cancerígeno para humanos. O composto também tem sido associado a efeitos adversos no sistema imunológico humano (LIANG et al., 2022). Alguns estudos epidemiológicos, como Zhang et al. (2023) e Wen et al. (2013), sugerem uma associação entre a exposição ao PFOS e um maior risco de doenças cardiovasculares, como pressão alta, doença arterial coronariana e acidente vascular cerebral. A exposição ao PFOS durante a gravidez tem sido associada a efeitos adversos no desenvolvimento infantil. Estudos sugerem que altos níveis de exposição ao PFOS podem estar relacionados abaixo peso ao nascer, problemas de crescimento e neurodesenvolvimento em crianças (DALSGER et al., 2016).

O PFOA está presente em 4 dos 7 documentos (controlado exclusivamente como um parâmetro voltado para a proteção da saúde humana). Trata-se de um composto químico sintético usado em muitos produtos que é tóxico e persistente no meio ambiente e no corpo humano. Foi identificado como a espécie mais tóxica na família de ácidos carboxílicos perfluorados (PFCAs). Tem sido amplamente distribuído e frequentemente detectado em águas residuais ambientais (ZANGO et al., 2023). Os efeitos adversos no corpo humano são semelhantes aos efeitos do PFOS, estando associados a efeitos tóxicos no fígado, sistema endócrino, sistema imunológico, sistema reprodutivo e sistema cardiovascular (LIANG et al., 2022). Na classificação da IARC (2024) o composto é classificado no grupo 1 sendo cancerígeno para humanos.

A sucralose está presente em 4 dos 7 documentos (controlada exclusivamente como um parâmetro de eficiência), sendo um adoçante artificial, aproximadamente 600 vezes mais doce que o açúcar, amplamente utilizado em alimentos e bebidas (YOO et al., 2023). Ela persiste durante o tratamento de esgoto e em ambientes aquáticos superficiais, sendo sugerida como um marcador eficaz de esgoto. Em um estudo, a persistência de longo prazo da sucralose foi

examinada em águas subterrâneas no Canadá, e a partir de uma avaliação conduzida por 6 anos, chegou-se a um tempo de meia-vida de cerca de 1 ano para o composto (ROBERTSON et al., 2016).

O triclosan está presente em 4 dos 7 documentos (na Austrália, é controlado como um parâmetro voltado para a proteção da saúde humana; nos demais, como um parâmetro de eficiência). O triclosan é um composto antibacteriano presente em produtos de cuidados pessoais e limpeza, potencialmente prejudicial à saúde e ao meio ambiente (CHEN et al., 2023). Trata-se de um composto desregulador endócrino, e sua crescente presença em recursos hídricos, seu potencial de bioacumulação em tecidos adiposos e sua toxicidade em organismos aquáticos são preocupações para a saúde humana e ambiental. O composto já foi detectado no sangue, leite materno, urina e unhas de seres humanos. O triclosan é estável à hidrólise; estudos laboratoriais mostraram que ele é estável nos pHs 4, 7 e 9, e não se espera que volatilize significativamente, dada sua baixa pressão de vapor de 4×10^{-6} mm Hg a 20 °C. No entanto, com processos avançados de tratamento, como microfiltração/nanofiltração com osmose inversa, alcançou-se uma remoção quase completa do composto (OLANIYAN et al., 2016).

A detecção dos micropoluentes é uma ferramenta poderosa que pode fornecer informações importantes sobre sistemas aquáticos, como mudanças em uma bacia hidrográfica e processos como sua degradação. O uso dos micropoluentes como indicador de eficiência em processos de tratamento para obter informações qualitativas e quantitativas abre um amplo espectro de abordagens potenciais (WARNER et al., 2019).

O aumento do uso de micropoluentes como indicadores de eficiência em tratamentos de reutilização de água potável é uma tendência cada vez mais comum no campo da engenharia ambiental. Micropoluentes como gemfibrozil, sucralose e triclosan são exemplos de micropoluentes já utilizados como indicadores em regulamentações de reutilização potável (MEDEIROS, 2022). A análise desses compostos pode fornecer informações valiosas sobre a eficiência dos processos de tratamento e permitir ajustes necessários para atender aos padrões de qualidade da água potável. Além disso, a identificação e monitoramento de micropoluentes são importantes para o estabelecimento de regulamentações e diretrizes para o tratamento de água, sendo fundamental para garantir a saúde pública e a sustentabilidade ambiental.

Ao contemplar o reúso potável direto de água, os países também devem aderir às regulamentações de água potável. Essas regulamentações podem abranger o controle de certos micropoluentes, o que exige uma análise cuidadosa para garantir a produção de água reciclada segura para o consumo. Essa conformidade dupla, tanto com os padrões de água potável quanto

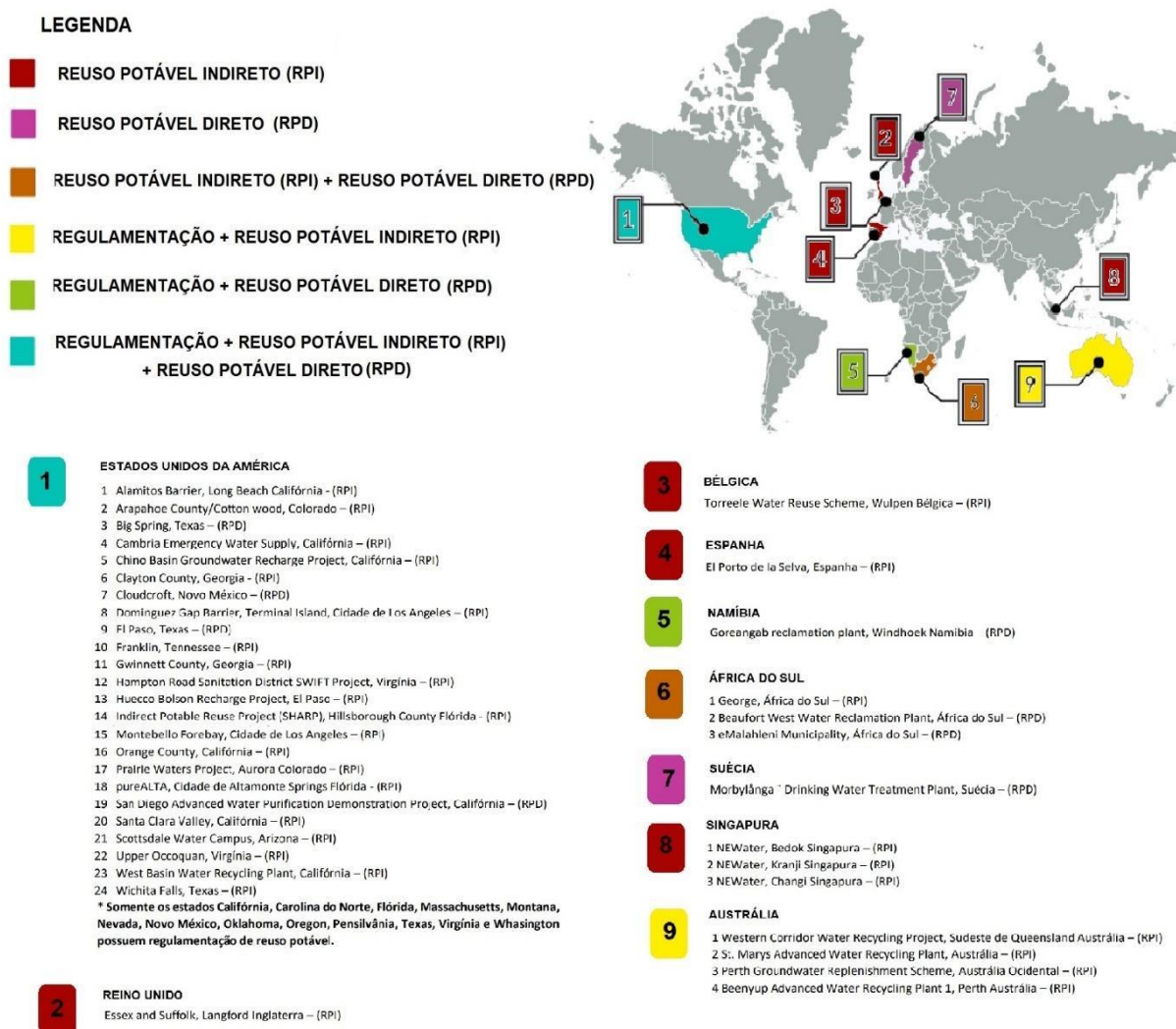
com os de reutilização de água, é imperativa para proteger a saúde pública e manter a integridade das práticas de reúso de água.

Como mencionado anteriormente, o reúso potável apresenta benefícios significativos, mas também levanta algumas preocupações. Entre os benefícios, de acordo com Gerrity et al. (2018) e Remy et al. (2019), está a conservação dos recursos hídricos, pois o reúso potável permite uma redução na demanda por fontes tradicionais de água doce. Além disso, contribui para a segurança hídrica, fornecendo uma fonte adicional de água potável em regiões com escassez hídrica. No entanto, como observado na discussão anterior, é importante considerar preocupações relacionadas aos micropoluentes, como produtos farmacêuticos e produtos químicos persistentes, que podem não ser completamente removidos por processos de tratamento convencionais. Esses micropoluentes podem representar riscos de longo prazo para a saúde humana (PASSOS et al., 2017). Além disso, o reúso potável levanta preocupações relacionadas à aceitação pública e à confiança na qualidade da água. Portanto, é crucial implementar tecnologias avançadas de tratamento, como processos de remoção de micropoluentes, para garantir que a água de reúso atenda a padrões rigorosos de qualidade e segurança, e que a prática do reúso potável seja adotada de forma sustentável e confiável (PICO et al., 2018).

4.1.2. Aspectos práticos do reúso potável no mundo (TTC 2)

Como resultado da revisão sistemática, dos 25 trabalhos selecionados, 7 foram utilizados para coleta de informações nos quais foram encontradas 39 estações de reúso de água potável em operação em todo o mundo, principalmente localizadas nos Estados Unidos da América. A Figura 13 lista essas instalações, classificando-as em reutilização potável direta, indireta ou ambas, e indica se há regulamentações para a reutilização potável nesse país/região.

Figura 13 - Estações de tratamento de água potável ao redor do mundo, com ênfase no tipo (direta, indireta ou ambos) e na presença de regulamentações



Fonte: A autora

Entre as 39 instalações de reuso potável, 24 estão nos Estados Unidos da América, 4 na Austrália, 3 em Singapura e 3 na África do Sul. O Reino Unido, Bélgica, Espanha, Namíbia e Suécia operam cada com uma instalação.

A maioria das instalações é de reutilização potável indireta, totalizando 30 das 39. Apenas 18 operam em um país/região com regulamentações para esse processo. Das 8 instalações de reutilização potável direta, apenas 3 não são respaldadas por uma regulamentação específica para a reutilização de água potável.

A Tabela 2 mostra o ano de inauguração das instalações de reutilização, o tipo de reuso adotado, sua capacidade e o processo de tratamento utilizado em cada uma das 39 instalações atualmente em operação.

Tabela 2 - Plantas de reúso potável em operação

ANO DE INSTALAÇÃO	PLANTA	TIPO DE REÚSO	CAPACIDADE (MGD)	PROCESSO	REFERÊNCIA
1962	Montebello Forebay, Distritos de Saneamento do Condado de Los Angeles	RPI: RAE	166	FG → CI	01, 02, 03, 07
1969 e 2002	Windhoek, Namíbia, Goreangab Central de Recuperação	RPD: EETA	5.5	CAP → O3 → CC → FAD → FCA → O3/POA → CAB/CAG → UF → CI	01, 02, 03, 04, 05, 06
1978	Upper Occoquan Service Authority Projeto de Reúso Potável da Virgínia	RPI: SA	204	FG → CAG → TI → CI	01, 02, 03, 06, 07
1985	Clayton County, Georgia	RPI: SA	68	CI → UV	01, 02, 07
1985	Huecco Bolson Recharge Project, El Paso Serviços de Água	RPI: RAI	38	CC → FG → O3 → CAG → O3 → CI	01, 02, 07
1995	West Basin, Central de Reciclagem de Água da Califórnia	RPI: RAI	66	O3 → MF → OI → UV/POA	01, 02, 07
1999	Gwinnett County, Georgia	RPI: AS	227	UF → O3 → CAG	01, 02, 07
1999	Scottsdale Water Campus, Arizona	RPI: RAI	76	FG → MF → OI → UV	01, 02, 07
2002	Dominguez Gap Barrier, cidade de Los Angeles	RPI: RAI	23	FG → MF → OI → UV/POA	01, 02, 07
2002	Torreele Esquema de Reúso de Água, Wulpen - Bélgica	RPI: SA	8	FB → UV	01, 02, 03
2003	NEWater, Bedok - Singapura	RPI: SA	87	UF → OI → UV	01, 02, 03, 06
2003	Essex and Suffolk, Langford	RPI: SA	30	FB → UV	01, 02, 03
2003	NEWater, Kranji - Singapura	RPI: SA	57	UF → OI → UV	01, 02, 03, 06

ANO DE INSTALAÇÃO	PLANTA	TIPO DE REÚSO	CAPACIDADE (MGD)	PROCESSO	REFERÊNCIA
2005	Alamitos Barrier, Califórnia	RPI: RAI	30	FG → MF → OI → UV/POA	01, 02, 07
2007	Chino Basin Projeto de Recarga de Água Subterrânea, Inland Empire	RPI: RAE	68	FG → CI	01, 02, 07
2007	eMalahleni Municipality, África do Sul	RPD: EETA	60	OI → MBR	06
2007	San Diego Projeto de Demonstração Avançada de Purificação de Água	RPD + SA	68	MF → OI → UV/POA	01, 02, 07
2008	Orange County, Califórnia	RPI: RAE e RAI	378	UF → OI → UV/POA	01, 02, 03, 06, 07
2009	Arapahoe County/Cottonwood, Colorado	RPI: SA	34	FG → OI → UV/POA → CI	01, 02, 07
2009	Western Corridor Projeto de Reciclagem de Água, Sudeste de Queensland Australia	RPI: SA	61	UF → OI → UV/POA	01, 02, 03
2009	George, África do Sul	RPI: SA	10	PR → UF → CI	01, 02
2010	Prairie Waters Project, Aurora - Colorado	RPI: RPIS	189	FMR → ASR → DP → UV/POA → CAB → CAG → CI	01, 02, 07
2010	St. Marys Central Avançada de Reciclagem de Água, Austrália	RPI: SA	211	UF → OI → UV	01, 03
2010	NEWater, Changi - Singapura	RPI: SA	122	UF → OI → UV	01, 02
2011	Beaufort West Planta de Recuperação de Água, África do Sul	RPD: EETA	0.26	FCA → UF → OI → UV/POA → CI	01, 02, 03, 04, 05
2013	Big Spring, Texas, EUA	RPD: EETA	7	MF → OI → UV/POA → Tratamento convencional	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07
2014	Perth Esquema de Reposição de Água Subterrânea, Western Australia	RPI: RAI	10	UF → OI → UV	03
2014	Cambria Abastecimento Emergencial de Água	RPI: RAI	2	UF → OI → UV/POA	01, 02, 07

ANO DE INSTALAÇÃO	PLANTA	TIPO DE REÚSO	CAPACIDADE (MGD)	PROCESSO	REFERÊNCIA
2014	Wichita Falls, Texas (RPD temporário, RPI de longo prazo implementado em 2015)	RPI: RAI	26	MF → OI → UV → AR	01, 02, 03, 05, 07
2015	El Porto de la Selva - Espanha	RPI: RAE	2.5	FG → UV	01, 03
2015	Projeto de reúso potável indireto (SHARP), Hillsborough County Flórida	RPI: RAI	2	UF → OI → UV	07
2016	Cloudcroft, Novo México, EUA	RPI EETA	0.026	MBR → OI → UV/POA → AR	01, 02, 04, 05, 07
2016	Beenyup Advanced Water Recycling Plant 1, Perth - Austrália	RPI: RAI	10	UF → OI → UV	01, 02, 06
2016	pureALTA, Cidade de Altamonte Springs Florida	RPI: SA	20	UF → OI → UV	07
2018	Franklin, Tennessee	RPI: SA	30	MBR → O3 → CAG → Cl	01, 02
2019	Morbylångå " Planta de Tratamento de Água Potável - Suécia	RPD: EETA	4	PR → CO/FO → FAD → SBR → FCA → CO → UF → UV	01
2020	Hampton Road Sanitation District SWIFT project	RPI: RAI	454	MBR → OI → UV → Cl	01,02
2023	El Paso, Texas	RPD: EETA	38	MF → OI → UV/POA → CAG → Cl	01, 02, 05, 07

AR – Armazenamento; CAB – Carbono Ativado Biológico; Cl - Cloração; CO- Coagulação; DP – Dessalinização Parcial; EETA – Encaminhado para Estação de Tratamento de Água; FCA - Filtração contínua de areia; FAD – Flotação por Ar Dissolvido; FB – Filtração Biológica; FG – Filtração em meio Granular; FMR – Filtração à Margem do Rio; FO – Floculação; CAG - Carvão Ativado Granular; TI – Troca Iônica; CC – Clarificação com Cal; MBR – Biorreator de Membrana; MF - Microfiltração; O3 – Desinfecção por Ozônio; OI – Osmose Inversa; PR – Peneira rotativa; CAP – Carvão Ativado em Pó; RAE - Recarga de Aquífero por Espalhamento; RAI – Recarga de Aquífero por Injeção; RPD – Reúso Potável Direto; RPI – Reúso Potável Indireto; RPIS – Reúso Potável Superficial; UF - Ultrafiltração; UV – Radiação Ultravioleta; MGD – Milhões de galões por dia

01 – (JEFFREY *et al.*, 2022), 02 – (USEPA, 2017), 03 - (SANTOS *et al.*, 2022), 04 – (HESPANHOL, 2015), 05 – (LAHNSTEINER *et al.*, 2018), 06 - (WHO, 2017), 07 – (FLORIDA, 2020)

Fonte: A autora

As 3 maiores instalações em termos de fluxo realizam reutilização potável indireta. O projeto SWIFT do Hampton Roads Sanitation District, em operação desde 2020, possui a maior taxa de fluxo entre as 39 em operação, com 454 MGD, seguido por Orange County, Califórnia, com 378 MGD, e Gwinnett County, Geórgia, com 227 MGD. Vale lembrar que 1 MGD equivale a 3.785 m³/d.

De acordo com Kaur et al. (2022), o tratamento de água por osmose inversa surgiu no meio da década de 1950, mas só se tornou comercialmente disponível na década de 1970. O tratamento de água por ultrafiltração, por outro lado, surgiu na década de 1960 e se tornou comercialmente disponível na década de 1980. Esse cenário explica o aumento do uso da tecnologia de membranas na reutilização potável a partir de 1995 na West Basin Water Recycling Plant, Califórnia. O uso de ambas as tecnologias cresceu desde então, tornando-as as mais amplamente utilizadas dentre as instalações em operação hoje. A osmose inversa é o tratamento mais utilizado, presente em cerca de 63% das plantas, seguido pela ultrafiltração em cerca de 42% e POA presente em cerca de 37%.

Segundo Lin et al. (2022), os processos de oxidação avançada (POA) são altamente eficientes na remoção de micropoluentes, o que explica o aumento de seu uso em plantas em operação. Uma solução para garantir a remoção quase completa de micropoluentes seria a purificação do efluente por POAs e membranas de alta retenção de maneira complementar ao MBR (LIU et al., 2022).

Das 8 plantas de reutilização potável direta, 5 utilizam uma combinação de UF, RO e POA. Uma usa uma combinação de POA e UF, outra usa apenas RO e a última usa apenas UF, considerando as 3 tecnologias mais recorrentes.

Por outro lado, carvão ativado em pó, flotação por ar dissolvido e carvão ativado biológico são os tratamentos menos utilizados. Apenas a estação de recuperação de água de Windhoek, Namíbia, e a planta de recuperação de Goreangab utilizam PAC e BAC. A DAF é utilizada tanto na Morbylångå Drinking Water Treatment Plant, Suécia, quanto na estação de recuperação de Goreangab em Windhoek, Namíbia.

4.2. Parte 2 – Micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras (TTC3)

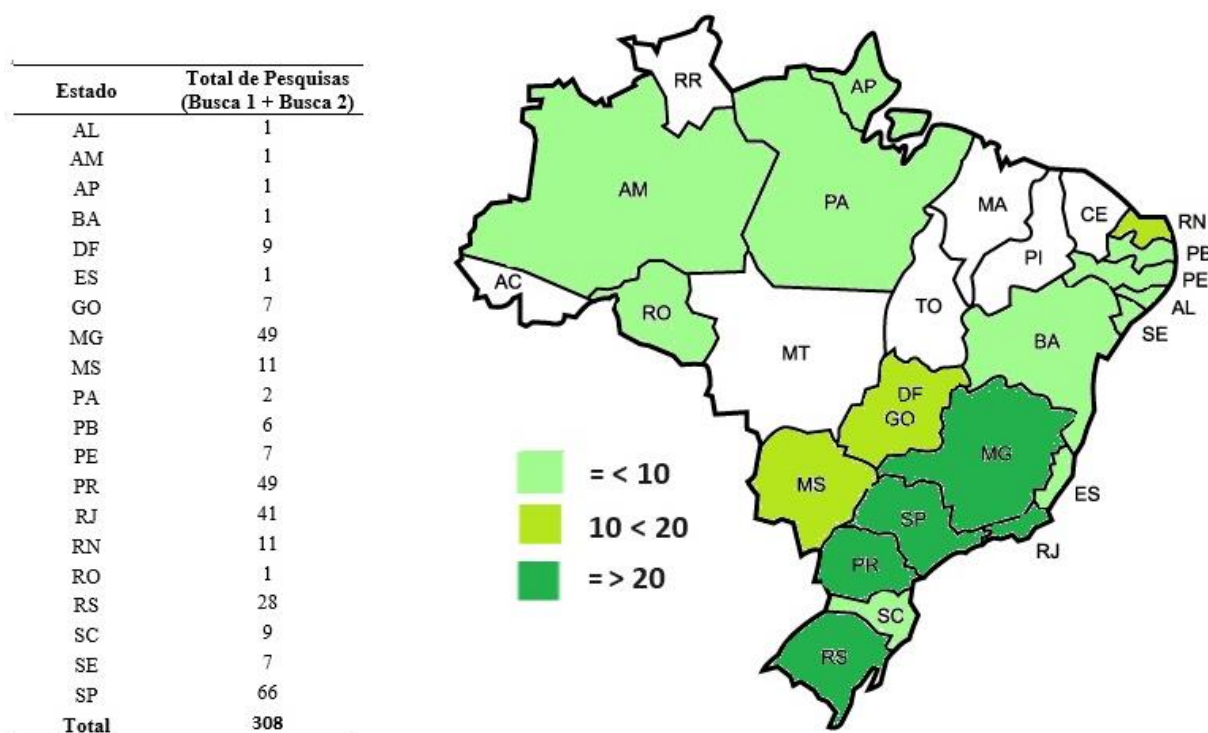
4.2.1. Aspectos gerais das buscas

Considerando todas as 4 etapas das buscas 1 e 2, definidas na metodologia da Parte 2, foram identificados e selecionados 337 documentos para análise em português que se dividiram em quatro categorias principais, conforme apresentado a seguir:

- Artigo Científico: 46
- Trabalho Acadêmico (Graduação): 91
- Trabalho Acadêmico (Mestrado): 134
- Trabalho Acadêmico (Doutorado): 66

É importante observar que a maior parte dos documentos encontrados corresponde a trabalhos acadêmicos de nível de mestrado e graduação. Isso sugere que existe um interesse na pesquisa acadêmica em relação ao tema de estudo. Para a análise dos micropoluentes mais estudados não foram utilizados os trabalhos de graduação, visto que não possuem peso científico, sendo assim foram selecionados 246 trabalhos. Como mencionado anteriormente, como resultado da busca 2, foram selecionados 62 artigos científicos. A distribuição dessas pesquisas por estados brasileiros é apresentada na figura 14.

Figura 14 -. Distribuição por estado das pesquisas nas buscas 1 e 2



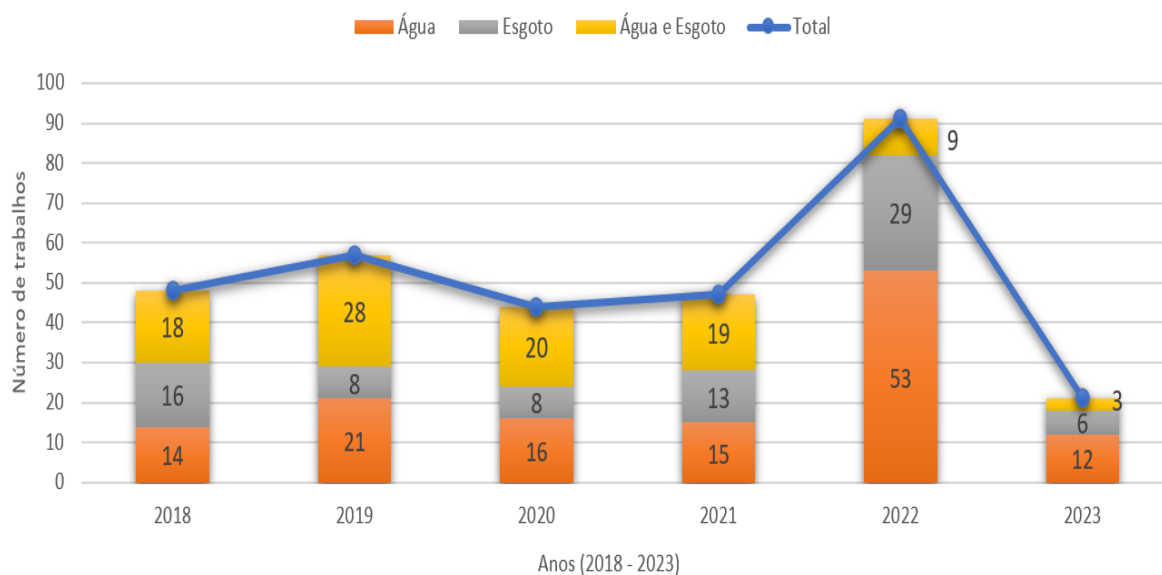
Fonte: A autora

A análise da distribuição geográfica das pesquisas revela algumas tendências interessantes. Os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio de Janeiro se destacam com o maior número de trabalhos publicados respectivamente, indicando uma maior concentração de pesquisa nessas regiões. Essa concentração pode ser atribuída à presença de universidades de renome, centros de pesquisa e recursos acadêmicos nessas áreas.

A distribuição geográfica das pesquisas encontradas indica que a produção de conhecimento sobre o tema não está uniformemente distribuída pelo país. Isso tem implicações importantes para a pesquisa futura, uma vez que pode ser relevante considerar as especificidades regionais ao planejar estudos ou intervenções relacionadas à regulamentação dos micropoluentes no Brasil. Além disso, pode ser benéfico promover a colaboração entre instituições de diferentes estados para compartilhar experiências e recursos.

Nos últimos 5 anos, o Brasil testemunhou uma notável evolução no interesse e na pesquisa relacionada aos micropoluentes. Esses compostos químicos, muitas vezes presentes em concentrações mínimas, podem ter impactos significativos no meio ambiente e na saúde humana, a Figura 15 mostra a relação das pesquisas neste período.

Figura 15 - Relação anual do número de pesquisas sobre micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras de 2018 a 2023



Fonte: A autora

A Figura 15 ilustra a evolução do número de pesquisas sobre micropoluentes ao longo dos anos. No período de 5 anos pode-se observar um pico no número de pesquisas no ano de 2022. A partir da Figura 15 e Tabela 3 é possível observar que a matriz água é predominante em quase todos os anos; somente em 2018 o número de pesquisas focadas em esgotos supera o número de água. Ou seja, no período estudado as pesquisas sobre micropoluentes estão mais relacionadas à presença dos compostos nos corpos hídricos brasileiros do que nos esgotos.

Tabela 3 - Relação das pesquisas por matriz aquáticas nas buscas 1 e 2

Matriz	Busca 1	Busca 2	Total de Pesquisas (Busca 1 + Busca 2)
Água	105	26	131
Esgoto	55	25	80
Água e Esgoto	86	11	97
Total	246	62	308

Fonte: A autora

Nos trabalhos analisados verificaram-se que 175 compostos específicos foram objeto em estudo único, ressaltando a concentração em áreas específicas de pesquisa. É notável que, dentro desse conjunto, 83,7% dos micropoluentes analisados possuem um número de trabalhos igual ou inferior a quatro, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição do número de compostos em relação ao número de trabalhos

Nº de compostos	Nº de Trabalhos	Frequência dos compostos
350	1 - 4 trabalhos	83,7%
38	5 - 9 trabalhos	9,1%
16	10 - 20 trabalhos	3,8%
14	21 - 82 trabalhos	3,3%

Fonte: A autora

Os resultados da Tabela 4 indicam que a maioria dos compostos está associada entre 1 a 4 trabalhos. Em seguida, 9,1% dos compostos têm entre 5 e 9 trabalhos relacionados. Compostos com 10 a 20 trabalhos representam 3,8% da amostra, enquanto aqueles com 21 a 82 trabalhos correspondem a 3,3% do total. Esses dados sugerem que a maioria dos compostos possui uma quantidade limitada de trabalhos associados, com uma pequena porcentagem apresentando um número mais significativo de publicações.

Em resumo, a distribuição revela que a maioria dos compostos têm uma presença limitada na pesquisa, enquanto alguns recebem atenção mais intensiva. Esses resultados podem

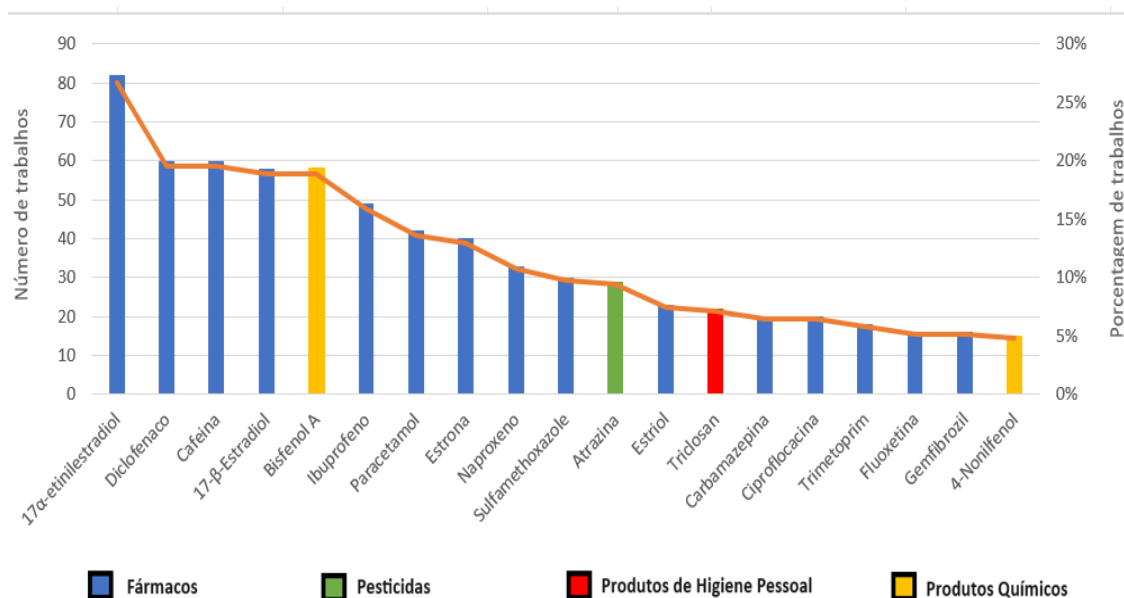
fornecer *insights* sobre a diversidade de compostos estudados, a profundidade da pesquisa associada a cada um e possíveis áreas de foco ou lacunas na literatura científica relacionada a esses compostos.

4.2.2. Micropoluentes estudados e indicações para padrões protetivos

Após uma análise dos resultados provenientes das pesquisas sobre a presença de micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras, foi possível identificar os compostos mais estudados desde 2018. Ao explorar os dados compilados, foi possível identificar padrões, tendências e áreas de preocupação específicas relacionadas a compostos de grande utilização pela população brasileira.

Nos últimos cinco anos, um total de 418 compostos foram estudados no Brasil, e a Figura 16 apresenta os resultados dessas substâncias mais estudadas em ambas as matrizes aquáticas nesse período separados por classe.

Figura 16 - Compostos mais estudados nos últimos 5 anos (2018-2023) no Brasil por classe



Fonte: A autora

Na Figura 16 observa-se que a maior parte dos compostos listados são fármacos, com um total de 15 compostos, incluindo o 17 α -etinilestradiol, diclofenaco, cafeína, 17- β -estradiol,

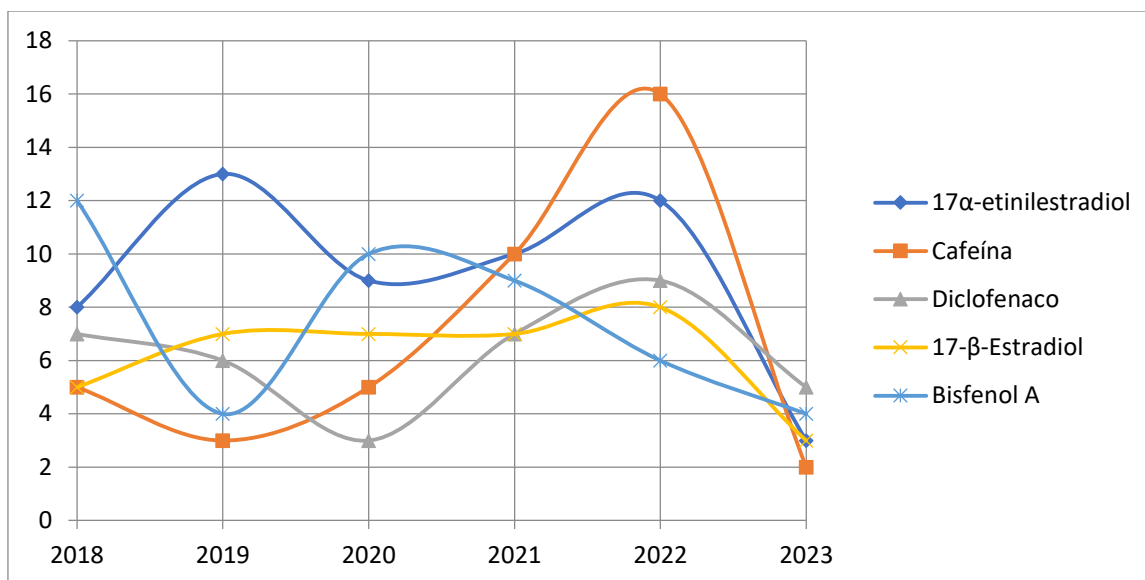
ibuprofeno, paracetamol, estrona, naproxeno, carbamazepina e fluoxetina. Esses compostos farmacêuticos têm sido alvo de crescente atenção devido à sua presença frequente em águas superficiais e potencial impacto ambiental (KHAN et al., 2020). A classe de fármacos abrange uma variedade de substâncias que incluem analgésicos, anti-inflamatórios, hormônios, antidepressivos e outros medicamentos.

A presença proeminente de compostos farmacêuticos destaca a necessidade urgente de compreender os efeitos ambientais dessas substâncias. A classe de fármacos é particularmente relevante devido à sua capacidade de afetar organismos aquáticos e ecossistemas, mesmo em concentrações muito baixas. A exposição contínua a esses micropoluentes pode ter implicações para a vida selvagem e para a saúde humana, tornando crucial a implementação de medidas de gestão e regulamentação para mitigar esses impactos (PORRETTI et al., 2022). O aumento na pesquisa desses compostos reflete o reconhecimento da importância de abordar os desafios associados à presença de fármacos no meio ambiente e destaca a necessidade de desenvolver estratégias sustentáveis para o gerenciamento desses micropoluentes. Tanto nos estados brasileiros quanto a nível federal não há regulamentação para fármacos e produtos de higiene pessoal, dos compostos apresentados na Figura 15; apenas atrazina, que é um pesticida, é regulamentada pela CONAMA 357/2005 e portaria 888/2021. Dias et al. (2018) realizaram estudo abrangente de revisão bibliográfica em um recorte temporal de 2000 a 2017. No estudo, os autores indicaram considerável presença de atrazina nas águas superficiais e subterrâneas do Brasil, inclusive com valores acima dos máximos permitidos pelo até então PRC MS nº 5 de 2017, Anexo 7, que vigorava na época, como regulamentação de potabilidade de água no Brasil.

A busca revelou que os cinco compostos mais frequentemente abordados nas pesquisas relacionadas ao cenário brasileiro são 17 α -etinilestradiol, diclofenaco, cafeína, 17- β -estradiol e bisfenol A, com 82, 60, 60, 58 e 58 trabalhos, respectivamente. A análise conjunta das duas fontes de pesquisa contribui para uma compreensão mais completa do panorama de estudos sobre micropoluentes no Brasil, proporcionando *insights* valiosos para futuras pesquisas e ações mitigadoras.

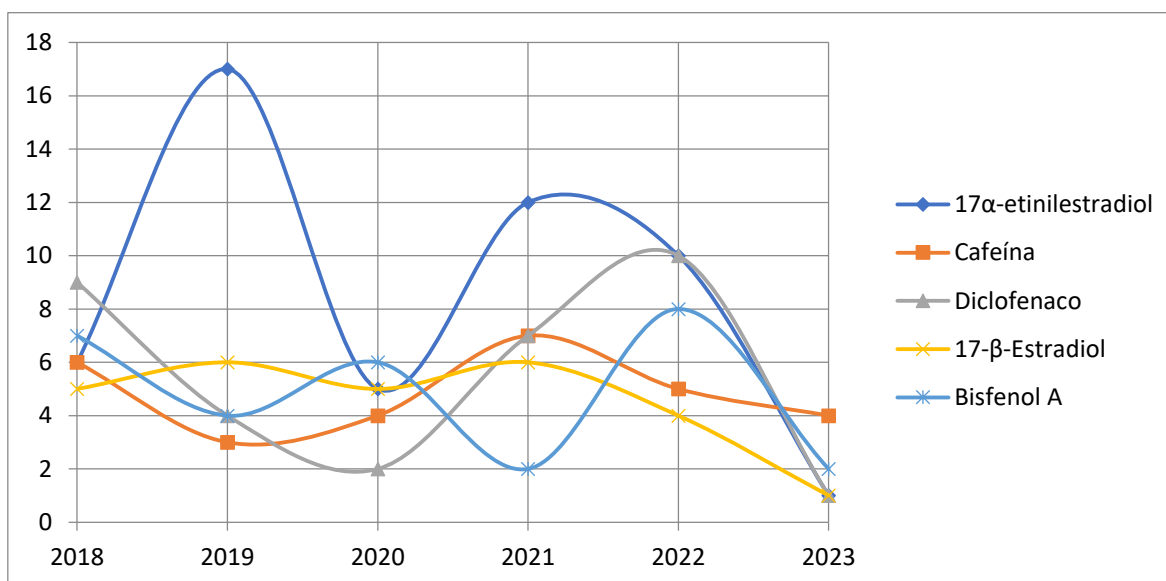
A Figura 17 apresenta uma análise temporal dos micropoluentes mais abordados em amostras de água e a Figura 18 em esgoto ao longo dos anos de 2018 a 2023.

Figura 17 - Análise temporal dos micropoluentes mais estudados na matriz água



Fonte: A autora

Figura 18 - Análise temporal dos micropoluentes mais estudados na matriz esgoto



Fonte: A autora

Essa análise revela mudanças nas prioridades de pesquisa ao longo do tempo, destacando a dinâmica na atenção dada a diferentes micropoluentes em água e esgoto. Essas variações podem ser influenciadas por fatores como avanços tecnológicos, preocupações emergentes na saúde pública e mudanças nas práticas industriais, refletindo a necessidade contínua de monitoramento e pesquisa para abordar os desafios associados à presença de

micropoluentes no ambiente. Vale ressaltar que alguns trabalhos abordaram a presença dos micropoluentes tanto na matriz água superficial quanto esgoto.

O mais pesquisado foi o 17α -etinilestradiol, estudado em 25% das pesquisas. Esse composto é um derivado sintético do hormônio estrogênio, é amplamente utilizado em contraceptivos orais devido à sua eficácia na prevenção da gravidez. Este composto, ao chegar às águas residuais, pode persistir no ambiente e, devido à sua natureza endócrina, suscita preocupações sobre os efeitos nos organismos aquáticos e, consequentemente, na saúde humana (MACHADO et al., 2011). Segundo IARC (2024) o 17α -etinilestradiol é classificado como grupo 1 sendo cancerígeno ao ser humano. Segundo Klaica e Jirsa (2022) a exposição crônica ao 17α -etinilestradiol pode influenciar o sistema endócrino, levando a desequilíbrios hormonais que, por sua vez, podem impactar a reprodução e o desenvolvimento de organismos, incluindo seres humanos. Este composto causa efeitos adversos mesmo em baixas concentrações, e ainda não é regulamentado em grande parte do mundo (HERRMANN et al., 2023). Como se pode observar nas Figuras 17 e 18, o 17α -etinilestradiol é estudado tanto na matriz água, quanto na matriz esgoto. Em teoria, como sua liberação ocorre pelas fezes e urina, um processo de coleta e tratamento eficiente de efluentes domésticos levaria a um melhor controle das suas concentrações em águas superficiais (WAN et al., 2022). Todavia, se deve controlar outras fontes como o descarte incorreto de fármacos e tratamento de efluentes hospitalares que muitas vezes também estão associados à presença desses compostos nos corpos hídricos.

Em segundo lugar está o diclofenaco (19 % dos trabalhos), um anti-inflamatório não esteroide, que é utilizado para alívio da dor e inflamação em pacientes humanos e animais. No entanto, a presença generalizada deste fármaco nas águas residuais levanta sérias preocupações ambientais e de saúde (AMANULLAH et al., 2023). A exposição a longo prazo ao diclofenaco pode resultar em efeitos adversos nos organismos aquáticos, com implicações para a cadeia alimentar. Além disso, a ingestão indireta de água contaminada por diclofenaco pode causar problemas renais e gastrointestinais em seres humanos, enfatizando a necessidade de avaliar e mitigar seus impactos ao longo do tempo (AZEVEDO et al., 2023).

Em terceiro, a cafeína (também com 19 % dos trabalhos) é uma substância estimulante encontrada em café, chá, bebidas energéticas e alguns medicamentos. Embora seja considerada segura em doses moderadas para os humanos, a sua presença disseminada no ambiente aquático representa um desafio significativo. Segundo Clayman e Connaughton (2022) concentrações elevadas de cafeína podem afetar negativamente organismos aquáticos, como peixes e anfíbios, impactando seu comportamento e ciclo reprodutivo. Além disso, em humanos, a cafeína em excesso pode levar a distúrbios do sono, ansiedade e palpitações cardíacas, ressaltando a

importância de regulamentações para controlar sua presença nas águas (REPANTIS et al., 2020).

A cafeína, identificada como indicador de atividade antrópica, revela a presença de efluentes domésticos em corpos d'água urbanos. Essa detecção é crucial para avaliar a contaminação ambiental, orientando estratégias de gestão e tratamento de recursos hídricos e destacando a cafeína como marcador químico essencial para identificar impactos da ação humana nos ecossistemas aquáticos (BEGA et al., 2021).

Em quarto lugar está o estradiol, que segundo Hajializadeh e Khaksari (2021) é um composto químico pertencente à classe dos estrogênios; hormônios sexuais predominantes nas fêmeas de mamíferos, incluindo os seres humanos. Este hormônio desempenha um papel crucial no desenvolvimento e funcionamento do sistema reprodutivo feminino, influenciando a regulação do ciclo menstrual, o crescimento dos tecidos mamários e a manutenção da saúde óssea. Apesar de sua importância biológica, o 17- β -estradiol também é considerado um micropoluentes preocupante devido à sua presença em sistemas aquáticos, muitas vezes proveniente de fontes como resíduos de produtos farmacêuticos, contraceptivos orais e excreção humana. A presença do 17- β -estradiol em concentrações ambientais pode suscitar preocupações devido aos potenciais efeitos de disruptor endócrino em organismos aquáticos e à possibilidade de impactos adversos na saúde ambiental. Em 2015, a União Europeia lançou uma lista de observação, “Watch List” para monitorizar, entre outros, o nonilfenol e o 17- β -estradiol no âmbito da Diretiva Quadro da Água (DQA) com vista a uma eventual regulamentação (RAPP-WRIGHT et al., 2023).

Em quinto lugar, o bisfenol A (BPA) é uma substância química amplamente usada na produção de plásticos, revestimentos de embalagens e resinas. Sua presença generalizada no meio ambiente levanta preocupações significativas, uma vez que estudos indicam que o BPA pode agir como um desregulador endócrino, interferindo nas vias hormonais naturais do corpo (XIAO et al., 2020). A exposição a esse composto tem sido associada a distúrbios hormonais, problemas reprodutivos e até mesmo ao desenvolvimento de certas condições de saúde, como diabetes e obesidade. A ampla utilização do BPA na fabricação de produtos do cotidiano, como garrafas plásticas e embalagens alimentícias, intensifica a importância de políticas de controle para limitar sua presença e minimizar os riscos à saúde humana (CIMMINO et al., 2020).

A crescente compreensão dos impactos desses compostos ressalta a necessidade urgente de políticas rigorosas de controle e regulamentação para monitorar e mitigar os efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. Dos 5 micropoluentes mais pesquisados, 3 são desreguladores endócrinos. Surpreendentemente, apenas a atrazina é regulamentada, enquanto,

de modo geral, os compostos monitorados carecem de regulamentação no Brasil. A preocupação recente com compostos como PFOS/PFOA é evidenciada por apenas 1 estudo, embora sejam investigados internacionalmente (LEUNG et al., 2022).

A importância de realizar uma busca quantitativa nas matrizes aquáticas é crucial para verificar se esses compostos estão presentes. Isso não apenas fortalece a base de evidências, mas também orienta medidas regulatórias para proteger ecossistemas aquáticos e a saúde humana, considerando a possível contaminação por substâncias prejudiciais. O controle do uso dessas substâncias, o desenvolvimento de alternativas mais seguras e a implementação de tecnologias avançadas de tratamento de água e de efluentes são essenciais para garantir a proteção a longo prazo da qualidade da água para consumo humano e a saúde da população.

Rezende (2022) conduziu uma revisão de 20 estudos que investigaram a presença de 41 poluentes de preocupação emergente nas águas superficiais brasileiras. Os resultados dessa análise revelaram que o Bisfenol-A foi o composto mais frequentemente detectado, seguido pela cafeína, diclofenaco, 17- β -estradiol, 17- α -etinilestradiol, naproxeno, triclosan e 4-n-nonilfenol. Essas descobertas alinham-se de maneira consistente com os resultados do presente trabalho, destacando uma correspondência direta entre os compostos mais estudados e aqueles mais frequentemente identificados no cenário brasileiro. Essa congruência ressalta a relevância desses poluentes específicos nas preocupações ambientais do país, sublinhando a importância contínua da pesquisa e monitoramento desses compostos para uma gestão eficaz da qualidade da água.

De acordo com Gomes (2018) que realizou uma quantificação das concentrações de 17 α -etinilestradiol na região do Lago Paranoá em Brasília, o 17 α -etinilestradiol foi encontrado em todas as amostras de esgoto bruto (1,31 – 2,08 ng. L⁻¹) e de efluente tratado (0,23 – 1,50 ng.L⁻¹), e em uma das amostras de água superficial do Lago Paranoá (0,07 ng. L⁻¹). Já no estado do Rio de Janeiro, o 17 α -etinilestradiol foi encontrado no sistema lagunar de Itaipu com a concentração de 53,9 ng. L⁻¹ (CUNHA, 2018). Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 1,83 ng. L⁻¹ como a menor concentração e 4390 ng. L⁻¹ como a maior concentração quantificada.

O diclofenaco foi quantificado em 40,8 ng. L⁻¹ no rio lontra no estado do paraná (KOERICH et al., 2021). Já Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 5,35 ng. L⁻¹ como a menor concentração e 785 ng. L⁻¹ como a maior concentração quantificada.

A cafeína foi quantificada em 230,4 ng. L⁻¹ no rio lontra no estado do paraná (KOERICH et al., 2021). A cafeína foi também encontrada nas amostras das águas provenientes do Córrego Rico, que está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu no estado de São

Paulo, com concentração máxima de 406,2 ng.L⁻¹ no período mais seco (CARVALHO et al., 2022). Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 0,3 ng. L⁻¹ como a menor concentração e 41700 ng. L⁻¹ como a maior concentração quantificada.

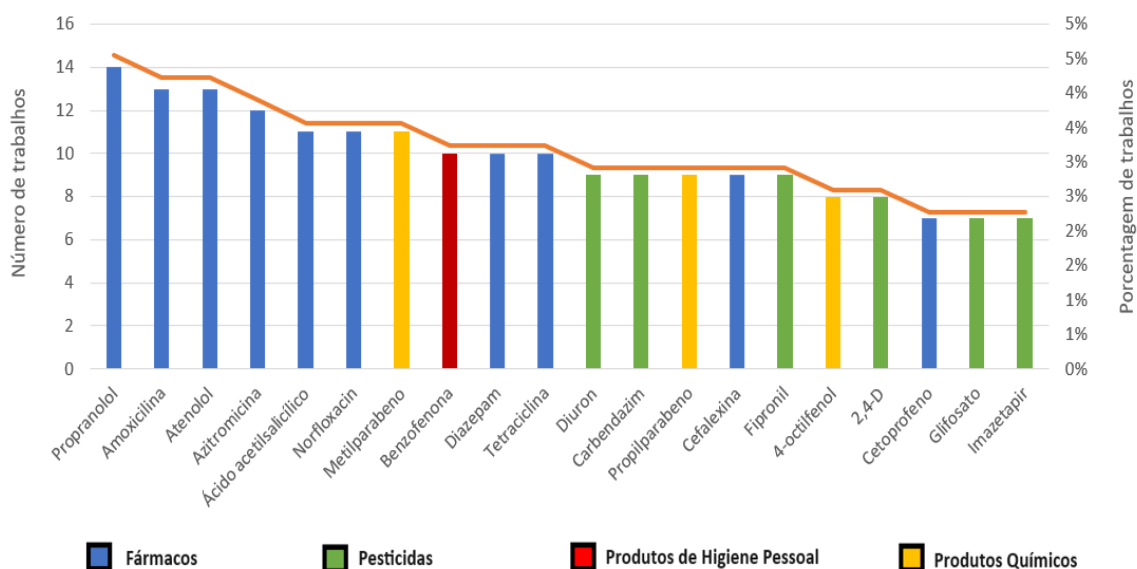
Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 2,89 ng. L⁻¹ como a menor concentração e 6806 ng. L⁻¹ como a maior concentração de 17-β-estradiol quantificada na Bacia do Rio Atibaia em Campinas, estado de São Paulo. No estado do Rio de Janeiro, o 17-β-estradiol foi encontrado no sistema lagunar de Itaipu com a concentração de 11,4 ng. L⁻¹ e 23,8 ng. L⁻¹ foi a concentração quantificada no sistema lagunar de Piratininga (CUNHA, 2018).

No estado do Rio de Janeiro, o bisfenol A foi encontrado no sistema lagunar de Itaipu com a concentração de 368,4 ng. L⁻¹ e 251,9 ng. L⁻¹ foi a concentração quantificada no sistema lagunar de Piratininga (CUNHA, 2018). Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 0,3 ng. L⁻¹ como a menor concentração e 41700 ng. L⁻¹ como a maior concentração de bisfenol A.

A análise de concentrações em diferentes locais, como no Lago Paranoá em Brasília, no rio Itonia no estado do Paraná e na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu em São Paulo, mostra as concentrações variadas encontradas e ressalta a complexidade das fontes e dos padrões de contaminação. As variações observadas destacam a importância de uma vigilância contínua e estratégias eficazes para mitigar os impactos desses micropoluentes no ambiente aquático brasileiro.

Em relação à regulamentação, é notável que muitos dos compostos encontrados neste estudo ainda não possuem uma regulamentação específica no Brasil, indicando uma lacuna regulatória que merece atenção. Esse é o caso especialmente para os compostos destacados na Figura 16, que representam os mais estudados na lista. Por outro lado, é interessante observar que os compostos destacados na Figura 19, que compõem o segundo grupo mais estudado, em sua maioria, já têm uma regulamentação estabelecida. Isto sugere um alinhamento entre o aumento do escrutínio científico e a subsequente implementação de regulamentações para essas substâncias, indicando um movimento em direção ao controle e monitoramento mais efetivo desses compostos no país. Essa correlação ressalta a importância de pesquisas científicas na influência das políticas de regulamentação.

Figura 19 - Compostos estudados por 7 a 14 trabalhos e suas classes



Fonte: A autora

Os resultados da análise indicam uma diversidade de compostos químicos presentes na lista, classificados em quatro categorias principais: Fármacos, Pesticidas e Agrotóxicos, Químicos Industriais e Produtos de Higiene Pessoal. Os fármacos compõem a categoria mais extensa, refletindo um interesse substancial em substâncias farmacêuticas. Compostos como analgésicos, antibióticos, antivirais, anti-hipertensivos e outros medicamentos são prevalentes, indicando uma forte ênfase nas investigações relacionadas à saúde humana.

Agrotóxicos são o segundo grupo mais presente nos resultados da pesquisa, o que sugere uma atenção considerável aos impactos ambientais e de saúde associados à agricultura. Esta categoria inclui herbicidas, fungicidas, inseticidas e outros produtos químicos agrícolas, refletindo preocupações sobre a segurança alimentar e os efeitos no ecossistema. Químicos Industriais são a terceira categoria mais encontrada, embora numericamente menor em comparação com as duas categorias anteriores. A presença de químicos industriais aponta para a investigação de substâncias utilizadas em processos industriais. Esses compostos podem ter diversas aplicações, desde produtos manufaturados até processos de fabricação.

Produtos de Higiene Pessoal é a categoria menos representada na lista, incluindo compostos encontrados em produtos de cuidado pessoal, como protetores solares, conservantes em cosméticos e antimicrobianos. Embora numericamente menor, reflete um interesse contínuo na segurança e eficácia desses produtos.

A Tabela 5 compara os resultados obtidos no TTC 2 e TTC 3, listando quais compostos estavam em 2 ou mais legislações de reúso potável no mundo e também estavam presentes em 2 ou mais trabalhos analisados no Brasil.

Tabela 5 - Comparação dos compostos regulamentados no mundo e pesquisados no Brasil

Composto	Legislações de reúso no mundo	Número de pesquisas no Brasil
17- β -estradiol	4	58
17 α -etinilestradiol	2	82
2,4-D	2	8
Atenolol	3	13
Atrazina	2	29
Bisfenol A	2	58
Cafeína	2	60
Carbamazepina	3	20
Carbofurano	2	6
Estrona	3	40
Gemfibrozil	4	16
Nonilfenol	2	15
Simazina	2	2
Sucralose	4	4
Sulfamethoxazole	3	30
Triclosan	4	22

Fonte: A autora

Os números na Tabela 5 indicam o nível de legislações de reúso no mundo para cada substância, bem como o número de pesquisas realizadas no Brasil sobre o tema. O 17- β -estradiol se destaca sendo um dos compostos mais regulamentados em reúso de água no mundo e um dos mais pesquisados no Brasil. Outros que também se destacam são o Triclosan e o Gemfibrozil, que foram medianamente pesquisados no Brasil, porém estão definidos em 4 regulamentações de reúso potável no mundo.

A comparação entre os compostos mais regulamentados em reúso potável de água no mundo e os mais estudados no Brasil (em diferentes matrizes aquáticas) mostra as preocupações e prioridades em relação à qualidade da água em diferentes contextos geográficos e regulatórios. Essa comparação permite identificar áreas de convergência e divergência entre as preocupações globais e nacionais. Compreender quais compostos são alvo de regulamentações em nível internacional oferece *insights* sobre os poluentes considerados mais críticos e os riscos percebidos associados ao reúso de água em diferentes partes do mundo. Assim, o entendimento mais amplo sobre essas regulamentações internacionais pode auxiliar o processo regulatório brasileiro.

Além disso, a comparação revela quais compostos estão no centro das atenções da comunidade científica brasileira e das autoridades regulatórias mundiais. Isso pode refletir as demandas específicas do país, os padrões de consumo, as práticas industriais e agrícolas, bem como os desafios únicos relacionados à gestão da água e à proteção da saúde pública.

Ao identificar os compostos que estão presentes em ambas as listas, é possível destacar áreas de preocupação comuns e prioridades compartilhadas no que diz respeito ao reúso de água e à proteção da saúde humana e do meio ambiente. Esses compostos podem servir como pontos focais para a implementação de políticas de gestão da água e regulamentações baseadas nas concentrações adotadas mundialmente. A comparação entre os 15 compostos mais frequentes em regulamentações/documentos orientativos internacionais e os 15 compostos mais pesquisados nas diferentes matrizes aquáticas brasileiras encontra-se apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação dos compostos regulamentados no mundo e pesquisados no Brasil

Compostos mais legislados em reúso	Compostos mais estudados no Brasil
1,4-Dioxane	17 α -etinilestradiol
17- β -estradiol	Cafeína
Gemfibrozil	Diclofenaco
Perfluorooctane sulfonate (PFOS)	17- β -Estradiol
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	Bisfenol A
Sucralose	Ibuprofeno
Triclosan	Paracetamol
Atenolol	Estrona
Carbamazepine	Naproxeno
Cotinine	Sulfamethoxazole
Estrone	Atrazina
Iohexol	Estriol
Meprobamate	Triclosan
N,N-diethyl-metatoluamide	Carbamazepina
N-Nitrosodimethylamine (NDMA)	Ciprofloxacina

Observação: o destaque em cinza refere-se aos compostos apresentados em ambas as listas.

Fonte: A autora

Pela análise da Tabela 6 é possível observar que o 17- β -Estradiol se destaca tanto em documentos de regulação/orientação mundial de reúso potável quanto em pesquisas no Brasil, sendo seguido pela estrona, triclosan e carbamazepina.

A comparação entre as duas pesquisas TCC2 e TCC3, revela uma disparidade significativa entre as regulamentações globais para o reúso potável de água e os estudos de micropoluentes conduzidos no Brasil. Na primeira análise, foram identificados sete documentos legais/orientativos que detalham os micropoluentes sujeitos a controle no contexto do reúso potável. Por exemplo, o 1,4-Dioxane emerge como o composto mais regulamentado globalmente, presente em cinco dos sete documentos examinados. Entretanto, é notável que nenhum estudo brasileiro tenha abordado esse composto nas matrizes locais.

Por outro lado, o 17- β -estradiol, regulamentado em quatro documentos internacionais sobre reúso potável, recebeu considerável atenção na pesquisa brasileira, com 37 estudos relacionados a águas e 27 a esgotos. Similarmente, o Gemfibrozil, também abordado em quatro documentos de controle mundial do reúso potável, foi alvo de 16 investigações nas matrizes brasileiras. Contudo, substâncias como PFOS e PFOA estão identificados em quatro regulamentações de reúso potável cada e foram encontrados em uma pesquisa no Brasil. Este cenário revela lacunas significativas entre as prioridades regulatórias internacionais e a investigação local.

Nesse contexto, a abundância de estudos sobre micropoluentes em águas brasileiras sugere uma preocupação crescente com a qualidade hídrica nacional. Por exemplo, o 17 α -etinilestradiol desponta como o micropoluinte mais estudado, presente em 55 pesquisas sobre águas e 51 sobre esgotos, apesar de contar apenas com dois padrões de controle nos documentos de reúso potável de água analisados.

É interessante observar que a cafeína, embora mencionada em apenas dois documentos internacionais de regulamentação do reúso potável, foi tema de 60 estudos no Brasil, evidenciando uma discrepância nas prioridades de pesquisa e regulamentação. O Diclofenaco, com 60 estudos realizados no país, não está sujeito a regulamentação nos documentos de reúso potável considerados. O Bisfenol A, com 58 pesquisas realizadas nas matrizes brasileiras, possui apenas dois documentos de controle internacional do reúso potável.

Assim, a comparação entre as pesquisas revela não apenas lacunas no entendimento dos micropoluentes, mas também a necessidade de alinhar os esforços de pesquisa às regulamentações globais para garantir a segurança e a qualidade da água no Brasil.

Uma abordagem integral seria estabelecer parâmetros de controle com base nas legislações existentes, mas adaptados à realidade nacional, mediante estudos que avaliem as concentrações e os efeitos dos micropoluentes nas diversas matrizes hídricas do país. Essa integração permitiria uma abordagem mais completa e eficaz na proteção dos recursos hídricos brasileiros, especialmente no contexto do reúso potável.

No Brasil, embora diversas instituições estejam conscientes do problema, há uma falta de estudos que examinem a presença de microcontaminantes, como PFOA e PFOS, em águas superficiais, subterrâneas e em efluentes sanitários, assim como seu destino durante os processos de tratamento de água e esgoto. Embora a Portaria de Potabilidade MS 888/2021 estabeleça padrões limite para certos compostos e substâncias químicas orgânicas e inorgânicas, ainda não há legislação que monitore especificamente os poluentes desta classe. Em 2009, alguns compostos foram incluídos na lista de produtos regulamentados pela Convenção de Estocolmo, com restrições na comercialização, produção e uso, contudo, é preocupante notar que, apesar de o Brasil ser signatário da Convenção de Estocolmo desde 2001, os dados de importação e exportação indicam um aumento no uso de PFOS e PFOA no país (MIRANDA, 2021).

Entre os compostos elencados na Tabela 6, é relevante notar que apenas a atrazina, dos compostos mais pesquisados no Brasil, é mencionada na Portaria de Potabilidade MS 888/2021. Por outro lado, dentre os compostos com valores de controle nos documentos de regulação/orientativos, tanto o dioxano quanto a NDMA possuem valores de controle estabelecidos na Portaria de Potabilidade MS 888/2021. Quando se considera a criação de uma regulamentação para o reúso potável de água no Brasil, seria prudente considerar as concentrações de controle já definidas na Portaria de Potabilidade MS 888/2021. Isso se justifica ao comparar os valores das concentrações de controle estipuladas na referida portaria com os valores utilizados em regulamentações de reúso potável em todo o mundo, onde observa-se que são semelhantes, se não idênticos. Portanto, adotar padrões de controle baseados nas legislações internacionais de reúso como referência para micropoluentes emergentes ainda não regulamentados pela Portaria brasileira seria extremamente benéfico para garantir a segurança hídrica da população, como pode ser evidenciado no Quadro 3.

Quadro 3 – Comparação das concentrações em µg/L de controles da Portaria 888/21 com os documentos de reúso potável

Composto	Portaria 888/21	WHO	Califórnia	Austrália	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
1,2-Dichloroethane	5	30					5	
2,4,6-Trichlorophenol	200	200						
2,4-D	30	30					70	
Acrylamide	0,5	0,5						
Alachlor	20	20					2	
Aldicarb	10	10						
Aldrin and Dieldrin	0,03	0,03						
Atrazine	2	100					3	
Benzene	5	10					5	
Benzo(a)pyrene (PAHs)	0,4	0,7					0,2	
Bromate	10				0,1			
Carbofuran	7	7					40	
Chlordane	0,2	0,2						
Chlorpyrifos	30	30						
DDT and metabolites	1	1						
Di(2-ethylhexyl)phthalate	8	8					6	
Dichloromethane	20	20					5	
Dioxin	48		0,0005	0,14				
Ethylbenzene	300	300					700	
Glyphosate	500						700	
HAA5 - Haloacetic acids	8				0,245			
Lindane	2	2						
Metolachlor	10	10						
Molinate	6	6						
N-Nitrosodimethylamine (NDMA)	0,1	0,1	0,002		0,003	0,002		
Pentachlorophenol	9	9					1	
Picloram	60						500	
Simazine	2	2					4	
Tetrachloroethene	40	100						
Toluene	30	700					1000	
Trichloroethene	4	8						
Trifluralin	20	20						
Xylenes	500	500					10000	

Fonte: A autora

A partir do Quadro 3 é possível identificar um total de 33 compostos, que são regulamentados em documentos específicos para o reúso potável em várias partes do mundo, que já se encontram normatizados no Brasil pela Portaria de Potabilidade MS 888/2021. É crucial observar que, dos 418 compostos investigados no contexto brasileiro na Parte 2 do presente trabalho, apenas 43 estão contemplados pela regulamentação estabelecida na Portaria MS 888/2021. Uma observação é que os compostos mais amplamente estudados no Brasil ainda não foram formalmente regulamentados pela Portaria MS 888/2021.

Além disso, é interessante notar que uma parcela significativa destes 43 compostos foi objeto de estudo em 2021 ou em anos anteriores. Isso levanta a possibilidade de que os compostos abordados pela portaria possam não estar sendo tão intensivamente pesquisados no Brasil após 2021, que é seu ano de publicação. Por outro lado, é crucial considerar que as pesquisas mais recentes podem revelar novas informações sobre os compostos ainda não regulamentados, o que poderia potencialmente levar a novas regulamentações no futuro. Essa dinâmica ressalta a necessidade contínua de revisão e atualização das políticas de regulamentação para refletir os avanços científicos e as preocupações emergentes em relação à qualidade da água e à saúde pública.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho de pesquisa desenvolveu, a partir de intensa revisão bibliográfica, um entendimento amplo sobre as preocupações mais acentuadas relacionadas aos micropoluentes no contexto prático e legal do reúso potável de água no mundo. Uma comparação desse cenário com os principais micropoluentes estudados no Brasil, permitiu pavimentar um caminho mais assertivo para uma futura regulamentação da prática no Brasil

Destaca-se que o reúso potável de água, de maneira planejada, já é realidade em muitas regiões do mundo, conforme apresentado ao longo do trabalho. Há que se considerar que o reúso potável indireto de água, de maneira não planejada, já é uma prática comum não só no Brasil, mas em outras regiões. Entretanto, por se tratar de uma prática não regulamentada e não estabelecida com o nome de reúso potável de água, as consequências para a saúde da população podem ser graves.

Diante do exposto e considerando o cenário internacional e nacional relacionado à preocupação com os micropoluentes na água, as principais conclusões do trabalho estão apresentadas a seguir:

. **Objetivo específico 1:** A realização de uma revisão integrativa sobre os aspectos legais que envolvem padrões de micropoluentes emergentes em reúso potável no mundo demonstrou que já se encontram em vigor no mundo, 19 documentos reguladores que orientam a prática. Destes, a maioria considera o caso do reúso potável indireto. De maneira geral, embora haja uma clara preocupação com os micropoluentes, somente 7 apresentam padrões para estes compostos e 256 compostos estão regulamentados nesse cenário em todo o mundo. Aqui há que se ressaltar que foram envolvidos tanto os documentos legais como os documentos orientativos sem força legal.

Objetivo específico 2: A realização de uma revisão sistemática sobre plantas de reúso potável em operação no mundo, e suas tecnologias de tratamento para remoção de micropoluentes demonstrou que a prática se encontra estabelecida no mundo. Assim como no contexto legal, os projetos de reúso potável de água em operação, são em sua maioria, na categoria indireta, considerando tanto o aumento de água nos mananciais superficiais como nos aquíferos subterrâneos. No recorte metodológico desenvolvido na presente pesquisa, é possível concluir que há pelo menos 39 plantas de reúso potável de água em operação em todo o mundo, sendo 30 delas de reúso potável indireto e com 24 do total, instaladas em território norte americano. De maneira geral, seguindo a preocupação com a remoção de micropoluentes nas estações de tratamento avançadas, a osmose inversa é o tratamento mais utilizado, presente em

cerca de 63% das plantas, seguido pela ultrafiltração em cerca de 42% e processos oxidativos avançados presentes em cerca de 37%. As capacidades das plantas variam amplamente, entre um mínimo de 0,26 MGD e um máximo de 454 MGD.

Objetivo específico 3: A realização de uma revisão sistemática sobre os micropoluentes em mananciais de abastecimento e nas águas residuárias brasileiras demonstrou que nos últimos 5 anos, entre 2018 e 2023, 308 trabalhos científicos foram publicados (em língua portuguesa e inglesa), considerando matrizes de água e esgoto. Neste grupo de trabalhos analisados, conclui-se que 418 compostos foram analisados no total, demonstrando a preocupação latente com os micropoluentes, no contexto científico. Os cinco compostos mais frequentemente abordados nas pesquisas relacionadas ao cenário brasileiro são 17 α -etinilestradiol, diclofenaco, cafeína, 17- β -estradiol e bisfenol A, com 82, 60, 60, 58 e 58 trabalhos, respectivamente.

Objetivo específico 4: A comparação entre os micropoluentes regulamentados no mundo no contexto do reúso potável de água e a predominância dos estudos desses compostos no Brasil ressalta o desafio da gestão hídrica para diversos fins, considerando a preocupação com os poluentes emergentes. Nesse sentido, uma comparação direta entre os 15 compostos mais referenciados nos documentos reguladores internacionais para reúso potável de água e os 15 compostos mais estudados nas matrizes aquáticas nacionais demonstram que somente 4 (17- β -Estradiol, Estrona, Triclosan e Carbamazepina) encontram-se nas duas listas. Do total de compostos regulamentado em documentos específicos para o reúso potável de água, 33 já se encontram normatizados no Brasil pela Portaria de Potabilidade MS 888/2021. Dos 418 compostos investigados no contexto brasileiro, apenas 43 estão contemplados pela regulamentação estabelecida na Portaria MS 888/2021.

Em síntese, a discussão do presente estudo reforça a necessidade de uma abordagem integrada entre pesquisa científica, regulamentação, gestão sanitária e de recursos hídricos para estabelecer o reúso potável de água no Brasil, como uma prática segura e planejada, a longo prazo. O estudo visa o embasamento de tomadas de decisão mais assertivas para enfrentar os desafios complexos relacionados à água e ao reúso potável, garantindo assim um futuro sustentável para todos.

6. RECOMENDAÇÕES

Embora o trabalho aqui apresentado tenha sido bastante esclarecedor e tenha permitido elucidar importantes lacunas científicas relacionadas à preocupação com micropoluentes emergentes no contexto do reúso potável de água, outras questões foram aparecendo durante a condução da pesquisa. A mais evidente delas é a concretização da indicação dos principais grupos de micropoluentes que devem ser abordados em uma futura regulamentação sobre reúso potável de água no Brasil.

Assim, como forma de convergir os resultados dos estudos da Parte 1 e da Parte 2 do presente trabalho, no início dessa pesquisa científica, intencionava-se realizar uma indicação dos compostos que poderiam nortear a definição de padrões para micropoluentes emergentes para reúso potável de água direto e indireto no Brasil. No entanto, mesmo considerando-se o criterioso trabalho de revisão bibliográfica que guiou esse estudo, o grupo de pesquisa que conduziu o trabalho entendeu que outros elementos devem ainda compor a investigação de forma que essa indicação possa ser mais segura do ponto de vista científico.

Diante disso, recomenda-se a condução de um estudo mais abrangente para envolver três aspectos que ainda carecem de respostas mais seguras no contexto científico:

- 1) Verificação da ocorrência e concentrações dos micropoluentes realizada na Parte 2.
- 2) Indicação dos micropoluentes que devem compor uma futura regulamentação de reúso potável de água no Brasil, considerando a relevância desses compostos no cenário socioeconômico e ambiental brasileiro.
- 3) Definição de padrões protetivos para a regulamentação da prática, tanto no contexto do reúso potável direto como do indireto. Destaca-se aqui o alinhamento com a Portaria de Potabilidade de Água vigente no país e o entendimento mais amplo a nível internacional.

Todas as recomendações pretendem ser investigadas no contexto da pesquisa de doutoramento da própria autora dessa dissertação.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 13969: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.
- ADASA. **Resolução Nº 005, de 09 de maio de 2022. Estabelece diretrizes para o aproveitamento ou reúso de água não potável em edificações no Distrito Federal. DODF nº 86, de 10 de maio de 2022**. Brasil, 2022.
- ADEGOKE, A. A.; AMOAH, I. D.; STENSTRÖM, T. A.; VERBYLA, M. E.; MIHELICIC, J. R. Epidemiological Evidence and Health Risks Associated With Agricultural Reuse of Partially Treated and Untreated Wastewater: A Review. **Frontiers in Public Health**, v. 6, 6 dez. 2018.
- AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (EPA). **Lista de candidatos a contaminantes de água potável 6-Nomeações**. Data de publicação: 17/02/2023. Páginas 10316-10318 (3 páginas). Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2023/02/17/2023-03426/drinking-water-contaminant-candidate-list-6-nominations>. Acesso em: 12 fev. 2024.
- AJALA, O., TIJANI, J., SALAU, R., ABDULKAREEM, A., AREMU, O. 2022. A review of emerging micro-pollutants in hospital wastewater: Environmental fate and remediation Options. **Results in Engineering**, Volume 16, December 2022, 10067.
- ALVES, T; GIRARDI, R; PINHEIRO, A. **Micropoluentes orgânicos: ocorrência, remoção e regulamentação**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319028922_Micropoluentes_organicos_ocorrencia_remocao_e_regulamentacao. Acesso em: 4 nov. 2023.
- Amanullah, A., Upadhyay, A., Dhiman, R., Singh, S., Kumar, A., Kumar, A., Ahirwar, D., Gutti, R., Mishra, A. 2022. Development and Challenges of Diclofenac-Based Novel Therapeutics: Targeting Cancer and Complex Diseases. **Cancers** 2022, 14(18), 4385; <https://doi.org/10.3390/cancers14184385>.
- ANA. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília, 2017.
- ANA. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil**. Brasília, 2019.
- ANA. **Atlas irrigação - uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno**. Brasília: [s.n.].
- ANGELAKIS, A. N. et al. Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, 11 maio de 2018.
- ARAUJO, B. M. et al. **Aspectos econômicos para o reúso na agricultura na Bacia do Rio Paraíba do Sul e comparação com o modelo da gestão de cobrança em Israel**. Juiz de Fora, Minas Gerais: Anais: III Simpósio de Recursos Hídricos do Rio Paraíba do Sul, 2018.

ARAUJO, L.; VILLA, N.; CAMARGO, N.; BUSTOS, M.; GARCÍA, T.; PRIETO, A. 2011. Persistence of gemfibrozil, naproxen, and mefenamic acid in natural waters. **Environmental Chemistry Letters** 9, 13–18 2011. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0239-5>.

ARKHANGELSKY, E.; DUEK, A.; GITIS, V. Maximal pore size in UF membranes. **Journal of Membrane Science**, P. 394- 395, 89 - 97. 2012.

AZEVEDO, C., MACHADO, F., SOUZA, N., SILVEIRA, L., LIMA, E., ANDREAZZA, R., BERGAMNN, C. 2023. Comprehensive adsorption and spectroscopic studies on the interaction of carbon nanotubes with diclofenac anti-inflammatory. **Chemical Engineering Journal**. Volume 454, Part 2, 15 February 2023, 140102.

BASTOS, R. K. X; KIPERSTOK, A.; CHERNICHARO, C. A. DE L.; FLORENCIO, L.; MONTEGGIA, L. O.; VON SPERLING, M.; AISSE, M. M.; BEVILACQUA, P. D.; PIVELI, R. P. Subsídios à regulamentação do reúso da água no Brasil - Utilização de esgotos sanitários tratados para fins agrícolas, urbanos e pisciculturais. **Revista DAE**, v. 56, n. 177, p. 50–62, 2008.

BEGA, J., OLIVEIRA, J., ALBERTIN, L., ISIQUE, W. Uso da cafeína como indicador de poluição por esgoto doméstico em corpos d'água urbanos. **Eng Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2, mar/abr 2021, p. 381-388.

BELLÓN, B., BLANCO, J., DE VOS, A., ROQUE, F., PAYS, O., RENAUD, P. 2020. Integrated landscape change analysis of protected areas and their surrounding landscapes: applicatio n in the Brazilian Cerrado. **Remote Sens**. 12(1413), 2-36.

BERNARDO, L., DANTAS, A.D.B., Voltan, P.E.N. (2017). **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**, 3ª ed., 1246p.

BOER, A.; MORVILLO, M.; ROTTGER-WIRTZ, S. 2023. **Fragmented Transparency: The Visibility of Agency Science in European Union Risk Regulation**. 2023.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. DOU, Brasil, 8 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>. Acesso em: 28 de nov. de 2022.

BRASIL. Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro 2005. **Estabelece modalidades, diretrizes e critérios para o reúso direito não potável de água, e dá outras providências**. **Diário Oficial da União**. Brasília, 28 nov. 2005.

BRASIL. Lei Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978**. DOU. Brasil. 5 jan. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm. Acesso em: 28 de nov. de 2022.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.** Diário Oficial da União. Brasília, 13 maio 2011.

BRASIL. Lei nº 14.026. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera as Leis nº 9.984/2020, nº 10.768/2003, nº 11.107/2005, nº 11.445/2007, nº 12.305/2010, nº 13.089/2015, nº 13.5029/2017.** Diário Oficial da União. Brasil. Diário Oficial da União, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005 (retificada).** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58.

Brasil. Ministério das Cidades. 2023. **Acesso à informação sobre saneamento - SNIS Painel.** Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel>. Acesso em: 02 fev. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021.** Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 maio 2021. Seção 1, p. 34.

BRIÃO, V. B.; SALLA, A. C. V; MIORANDO, T.; HEMKEMEIER, M.; FAVARETTO, D. P. C. Water recovery from dairy rinse water by reverse osmosis: Giving value to water and milk solids. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 140, 2019, p. 313-323.

CALIFORNIA. Water quality control policy for recycled water. 2018. **Water Quality Control Policy for Recycled Water** (ca.gov). Acesso em: 05 jan. 2024.

CANTO, F.; PINTO, A.; DIAS, T.; GAVRON, E.; TALAU, M. 2023. **Gsm_hdata: a bibliometric tool to analyze data from google scholar metrics.** Mobile Netw Appl (2023). <https://doi.org/10.1007/s11036-023-02258-9>.

CARVALHO, A.; SILVA, B.; MACHADO, A.; SANTAROSSA, M.; PAGANINI, W. 2022. A ocorrência de cafeína em águas superficiais para abastecimento público. **Eng. Sanit. Ambient.** 27 (4), Jul-Aug 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210201>.

CETESB. **Reuso de água** | Águas Interiores. 2022.

CHEN, X.; MOU, L.; QU, J.; WU, L.; LIU, C. 2023. Adverse effects of triclosan exposure on health and potential molecular mechanisms. **Science of The Total Environment.** Volume 879, 25 June 2023, 163068.

CIMMINO, I., FIORY, F., PERRUOLO, G., MIELE, C., BEGUINOT, F., FORMISANO, P., Oriente, F. 2020. Potential Mechanisms of Bisphenol A (BPA) Contributing to Human Disease. **International Journal of Molecular Sciences**. 2020; 21(16):5761. <https://doi.org/10.3390/ijms21165761>.

CLAYMAN, C., CONNAUGHTON, V. 2022. Neurochemical and Behavioral Consequences of Ethanol and/or Caffeine Exposure: Effects in Zebrafish and Rodents. **Curr Neuropharmacol**. 2022 Mar 4; 20(3): 560–578. Published online 2022 Mar 4. doi: 10.2174/1570159X19666211111142027.

COUTO, C., LANGE, L., AMARAL, M. A critical review on membrane separation processes applied to remove pharmaceutically active compounds from water and wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 26, p. 156-175, 2018.

COUTO, C. F., SANTOS, A. V., AMARAL, M. C. S., LANGE, L. C., ANDRADE DE L. H., FOUREAUX, A. F. S., FERNANDES, B. S. Assessing potential of nanofiltration, reverse osmosis and membrane distillation drinking water treatment for pharmaceutically active compounds (PhACs) removal. **Journal of Water Process Engineering**, v. 33, p. 1-12, 2020.

CUNHA, D. 2018. **Avaliação da ocorrência e impacto de contaminantes no sistema lagunar Itaipu-Piratininga, Estado do Rio de Janeiro – Brasil**. Tese (doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2018.d.11302153773>.

DA-RIN, Benito P. **Técnicas de tratamento de esgotos**. 1.ed. Rio de Janeiro: ABES EDITORA. 2021.

DALSAGER, L.; CHRISTENSEN, N.; HUSBY, S.; KYHL, H.; NIELSEN, F.; GRANDJEAN, P.; JENSEN, T. 2016. Association between prenatal exposure to perfluorinated compounds and symptoms of infections at age 1–4 years among children in the Odense Child Cohort. **Environment International**, Volume 96, November 2016, Pages 58-64.

DATASUS - **Departamento de informática do Sistema Único de Saúde do Brasil**. 2015. Disponível em: < <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php> > Acesso em: 02 fev. 2024.

DEMIR, T. 2022. In vivo effects of 1,4-dioxane on genotoxic parameters and behavioral alterations in *Drosophila melanogaster*, **Journal of Toxicology and Environmental Health**, Part A, 85:10, 414-430, DOI: 10.1080/15287394.2022.2027832.

DIAS, A. **Análise da interconexão dos sistemas de esgotos sanitário e pluvial da cidade do rio de janeiro: valorização das coleções hídricas sob perspectiva sistêmica**. Rio de Janeiro. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente. 2003.

DREWES, J. E., HÜBNER, U., ZHITENEVA, V., AND KARAKURT, S. (2017). **Characterization of Unplanned Water Reuse in the EU**. Garching: Technical Univ. of Munich. (prepared for the European Commission DG Environment), 60.

FERREIRA, J.; GOMES, M.; DANTAS, M. 2021. **Desafios e controvérsias do novo marco legal do saneamento básico no Brasil / Challenges and controversies of the new legal framework for basic sanitation in Brazil**. Brazilian Journal of Development, 7(7), 65449–65468. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n7-019>.

FIGLIAREZZA, M. & SCHMACHTENBERG, N. (2014). Processos oxidativo avançados: fundamentos e aplicação ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, 18 (1), 79-91. <http://dx.doi.org/10.5902/2236117010662>.

FLORIDA. **Framework for the Implementation of Potable Reuse in Florida**. 2020. Potable Reuse Chapter 62-610 F.A.C. and Framework for the Implementation of Potable Reuse in Florida Crosswalk (floridadep.gov). Acesso em: 22 abr. 2023.

FREO, U., RUOCCO, C., VALERIO, A., SCAGNOL, I., NISOLI, E. 2021. Paracetamol: A Review of Guideline Recommendations. **Journal of Clinical Medicine**. 2021; 10(15):3420. <https://doi.org/10.3390/jcm10153420>.

FUNASA. (2015). **Manual de saneamento**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde.

GALVÃO, A. **Desafios para a universalização dos serviços de água e esgoto no Brasil**. 2009. Rev. Panam Salud Pública. 2009, 25(6):548–56.

GAO, Y., ZHOU, J., RAO, Y., NING, H., ZHANG, J., SHI, J., GAO, N. 2022. Comparative study of degradation of ketoprofen and paracetamol by ultrasonic irradiation: Mechanism, toxicity and DBP formation. **Ultrasonics Sonochemistry** Volume 82, January 2022, 105906.

GERRITY, D.; TCHOBANOGLOUS, G.; SIMMONS, J. 2018. Developing sustainable potable reuse regulations through public health-based treatment targets. **Environmental Science & Technology**, 52(6), 3048-3058.

GOMES, J. 2018. **Análise da ocorrência do hormônio estrogênico, 17 α -etinilestradiol, o Lago Paranoá**. Dissertação (mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Brasília, 2018.

HAJIALIZADEH, Z., KHAKSARI, M. The protective effects of 17- β estradiol and SIRT1 against cardiac hypertrophy: a review. **Heart Fail Rev** 27, 725–738 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10741-021-10171-0>.

HEIDARI, A., SHAHBAZI, A., AMINABHAVI, T., BARCELÓ, D., RTIMI, S. 2023. A systematic review of clay-based photocatalysts for emergent micropollutants removal and microbial inactivation from aqueous media: Status and limitations. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Volume 10, Issue 6, December 2023, 108813.

HERRMANN, A.; COSTA, A.; MARTINHUK, N.; ARMAS, R. **Utilização de Bactérias Como Alternativa Para Biodegradação Dos Desreguladores Endócrinos 17 Beta-Estradiol e 17 Alfa-Etinilestradiol**. Epitaya E-books, [S. l.], v. 1, n. 27, p. 163-174, 2023. DOI: 10.47879/ed.ep.2023670p163. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/635>. Acesso em: 23 jan. 2024.

HESPANHOL, I. Reúso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes. **Revista USP**, n. 106, p. 79-94, 2015.

ISO. **ISO 20426:2018 - Guidelines for Health Risk Assessment and Management for Non-potable Water Reuse**. Geneva, 2018.

IARC. **Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1–135**. 2024. Disponível em: <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>. Acesso em: 10 fev. 2024.

JEFFREY, P.; YANG, Z.; JUDD, S. 2022. The status of potable water reuse implementation. *Water Research* 214. (2022).

JERRY, D.; SHULL, J.; HADSELL, D.; KAREN, A.; MAJHI, P.; SCHNEIDER, S.; HADSELL, D.; HADSELL, M.; VANDENBERG, L.; BYRNE, C.; TRENTAM-DIETZ, A. 2018. **Genetic variation in sensitivity to estrogens and breast cancer risk**. *Mamm Genome* 29, 24–37. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00335-018-9741-z>.

KAMAL, N.; SINDHU, R.; BHARGAVA, P. 2023. Biodegradation of emerging organic pollutant gemfibrozil: Mechanism, kinetics and pathway modeling. **Bioresource Technology** Volume 374, Abril 2023.

KAUR, R.; GOYAT, R.; SINGH, J.; UMAR, A.; CHAUDHRY, V.; AKBAR, S. 2022. An Overview of Membrane Distillation Technology: One of the Perfect Fighters for Desalination. **Engineered Science**.

KHAN, H., REHMAN, M., MALIK, R. Fate and toxicity of pharmaceuticals in water environment: An insight on their occurrence in South Asia, **Journal of Environmental Management**, Volume 271, 2020, 111030, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111030>.

KHAN, S. J.; ANDERSON, R. Potable reuse: Experiences in Australia. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 2, p. 55–60, abr. 2018.

KLAICA, M., JIRSA, F. 2022. **17 α -Ethinylestradiol (EE2): concentrations in the environment and methods for wastewater treatment – an update**. DOI: 10.1039/D2RA00915C (Review Article) *RSC Adv.*, 2022, 12, 12794-12805.

KOERICH, P.; KAEI, I.; VIEIRA, M.; BARBOSA, S.; SILVA, M.; PRIMEL, E.; RADUNZ, A.; CABRERA, L. 2021. Determinação de contaminantes emergentes no rio lontra (salto do lontra – Paraná). **Biodiversidade** - v.20, n.1, 2021 - pág. 106.

LAHNSTEINER, J.; RENSBERG, P.; ESTERHUIZEN, J. 2018. Direct potable reuse – a feasible water management option. **Journal of Water Reuse and Desalination** - 08.1. 2018. doi 10.2166/wrd.2017.172.

LEUNG, S., SHUKLA, P., CHEN, D., EFTEKHARI, E., AN, H., ZARE, F., GHASEMI, N., ZHANG, D., NGUYEN, N., LI, Q. 2022. Emerging technologies for PFOS/PFOA degradation and removal: A review. **Science of The Total Environment**, v. 827, 2022, p. 153669. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153669>.

LIANG, L.; PAN, Y.; BIN, L.; LIU, Y.; HUANG, W.; LI, R.; LAI, K. 2022. Immunotoxicity mechanisms of perfluorinated compounds PFOA and PFOS. **Chemosphere** Volume 291, Part 2, March 2022, 132892.

LIMA, M.; ARAUJO, B. M.; SOARES, S. R. A.; SANTOS, A. S. P.; VIEIRA, J. M. P. Water reuse potential for irrigation in Brazilian hydrographic regions. **Water Supply**, v. 21, n. 6, p. 2799–2810, 22 out. 2021.

LIN, W.; LIU, X.; DING, A.; NGO, H.; ZHANG, R.; NAN, J.; MA, J.; LI, G. 2022. Advanced oxidation processes (AOPs)-based sludge conditioning for enhanced sludge dewatering and micropollutants removal: A critical review. **Journal of Water Process Engineering**. Volume 45, February 2022, 102468.

LIU, N., JIN, X., FENG, C., WANG, Z., WU, F., JOHNSON, A., XIAO, H., HOLLERT, H., GIESY, J., 2020. Ecological risk assessment of fifty pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Chinese surface waters: a proposed multiple-level system. **Environ. Int.** 136, 105454. PMid:32032889. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2019.105454>.

LIU, W.; SONG, X.; HUDA, N.; LI, G.; LUO, W. 2020. Comparison between aerobic and anaerobic membrane bioreactors for trace organic contaminant removal in wastewater treatment. **Environmental Technology & Innovation** Volume 17, February 2020, 100564.

LIU, W.; SONG, X.; NA, Z.; LI, G.; LUO, W. 2022. Strategies to enhance micropollutant removal from wastewater by membrane bioreactors: Recent advances and future perspectives. **Bioresource Technology**. Volume 344, Part B, January 2022, 126322.

LU, X.; YE, Y.; WANG, Y.; XU, J.; SUN, J.; JI, J.; ZHANG, Y.; SUN, X. 2023. Rapid generation of high-quality recombinant antibodies using an Expi293F expression system for a 17 β -estradiol immunoassay. **Journal of Hazardous Materials**. Volume 451, 5 June 2023, 131126.

LOUREIRO, S. **Análise técnica e econômica da viabilidade de utilização de sistemas compactos de tratamento e reuso de efluentes domésticos em projetos de expansão urbana**. Ribeirão Preto. 2015.

MACHADO, R., POMPEI, L., GIRIBELA, A., GIRIBELA, C. 2011. Drospirenone/ethinylestradiol: a review on efficacy and noncontraceptive benefits. **Women's Health**, 2011, 7, 19–30.

MARSON, E., PANIAGUA, C., GOMES JÚNIOR, O., GONÇALVES, B., SILVA, V., RICARDO, I., STARLING, M., AMORIM, C., TROVÓ, A., 2022. A review toward contaminants of emerging concern in Brazil: Occurrence, impact and their degradation by advanced oxidation process in aquatic matrices. **Sci. Total Environ.** 836, 155605. PMid:35504382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155605>.

MASSACHUSETTS. **Reclaimed water permit program and standards**. 2009. Wastewater - Reclaimed Water. Mass.gov. Acesso em: 20 abr. 2023.

MEDEIROS, Úrsula. **Contaminantes emergentes em sistemas de tratamento de esgoto doméstico: impacto da carbamazepina na saúde e no meio ambiente**. 2022.

MENDONÇA, M.J.C., DA MOTTA, R.S. (2007). **Saúde e Saneamento no Brasil. Planejamento e políticas públicas**, 30, 15-30.

Ministério da Saúde (2006). **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano**. Brasília-DF, 213 p.

MONTANA. **Permitting and Operator Assistance**. 2009. Water Permitting and Operator Assistance | Montana DEQ (mt.gov). Acesso em: 20 abr. 2023.

MIRANDA, D. A., BENSKIN, J. P., AWAD, R., LEPOINT, G., LEONEL, J., & HATJE, V. (2021). Bioaccumulation of Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a tropical estuarine food web. **Science of The Total Environment**, 142146 pp. 1-11.

MOTA, C. N. DA S.; SAMPAIO FILHO, S. A. C.; SANTOS, V. R. A. DOS; HORA, H. R. M. DA; COSTA, H. G.; BARBOSA, A. L.. (2012). A multicriteria approach for the evaluation and classification of Brazilian capital cities according to the basic sanitation services. In: **IX CONGRESO LATINOAMERICANO IIE CIUDADES EN CRECIMIENTO**. Bogotá: Institute of Industrial Engineers.

MOURA, P; ARANHA, F; HANDAN, N; MARTIN, L; SALLES, M; CARVAJAL, E; JARDIM, R; SOTERO-MARTINS, A. **Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil**. Rio de Janeiro, 2020.

NEVADA. **Water controls**. 2018. STATE OF NEVADA (nv.gov). Acesso em: 20 abr. 2023.

NORTH CAROLINA. **Reclaimed water**. 2011. subchapterurules.pdf(nc.gov). Acesso em: 22 abr. 2023.

NEW MEXICO. **Natural resources and wildlife administration and use of water** – General Provisions - Underground storage and recovery. 2001. www.srca.nm.gov. Acesso em: 22 abr. 2023.

NRMMC-EPHC-NHMRC. **Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks: Phase 2**. Canberra, Australia, 2008. National Water Quality Management Strategy Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Augmentation of Drinking Water Supplies Acesso em: 22 abr. 2023.

OKLAHOMA. **Indirect potable reuse for surface water augmentation**. 2018. 628-Permanent-Rules-Draft.pdf. (ok.gov). Acesso em: 22 abr. 2023.

OLANIYAN, L., MKWETSHANA, N.; OKOH, A. 2016. Triclosan in water, implications for human and environmental health. **SpringerPlus** 5, 1639. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3287-x>.

OLIVEIRA, A.; MOREIRA, I.; SANTOS, L.; SOARES, P. 2018. Avaliação da ecoeficiência do sistema de filtração de água com a utilização de biocoagulante e bioadsorventes, para reúso direto não potável. **Brazilian Applied Science Review**, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 954–978, 2018. DOI: 10.34115/basr.v3i2.964. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/964>. Acesso em: 30 dec. 2023.

ORGANIZATION, W. H. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture and aquaculture**. [s.l.] World Health Organization, 2006.

ORGANIZATION, W. H. **Sanitation safety planning: manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta**. [s.l.] World Health Organization, 2015.

ORGANIZATION, W. H. **Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water**. [s.l.] World Health Organization, 2017.

OREGON. **Implementing Oregon's Recycled Water Rules**. 2009. Recycled Water IMD (oregon.gov). Acesso em: 20 jul. 2023.

OUYANG, D.; CHEN, Y.; CHEN, R.; ZHANG, W.; YAN, J.; GU, M.; LI, J.; ZHANG, H.; CHEN, M. 2022. Degradation of 1,4-dioxane by biochar activating peroxymonosulfate under continuous flow conditions. **Science of The Total Environment**. Volume 809, 25 February 2022, 151929.

PASSOS, C.; COELHO, F.; MARTINS, M.; AMORIM, S.; SANTOS, G.; BESSA, R. 2017. Assessing the presence and risk of micropollutants in reclaimed water for potable reuse in Portugal, **Science of The Total Environment**, Volume 598, 2017, Pages 1015-1024, ISSN 0048-9697.

PENNSYLVANIA. Pennsylvania Department of Environmental Protection. 2012. **Reuse of treated wastewater guidance manual** 385-2188-002. Acesso em: 20 jul. 2023.

PETEFFI, G., FLECK, J., Kael, I., ROSA, D., ANTUNES, M., LINDEN, R., 2019. **Ecotoxicological risk assessment due to the presence of bisphenol A and caffeine in surface waters in the Sinos River Basin - Rio Grande do Sul – Brazil**. *Braz. J. Biol.* 79(4), 712-721. PMID:30427383. <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.189752>.

PICO, R.; MESA, J.; VÁZQUEZ-SUÑÉ, E.; CARRERA, J. 2018. Risks associated with direct potable water reuse: State of the art and research needs. **Science of the Total Environment**, 619-620, 966-977.

PORRETTI, M., ARRIGO, F., DI BELLA, G., & FAGGIO, C. (2022). Impact of pharmaceutical products on zebrafish: An effective tool to assess aquatic pollution. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 261, 109439. ISSN 1532-0456.

RAPP-WRIGHT, H.; RODRÍGUEZ-MOZAZ, S.; ÁLVAREZ-MUÑOZ, D.; BARCELÓ, D.; REGAN, F.; BARRON, L.P.; WHITE, B. 2023. International Comparison, Risk Assessment, and Prioritisation of 26 Endocrine Disrupting Compounds in Three European River Catchments in the UK, Ireland, and Spain. *Molecules* 2023, 28, 5994. <https://doi.org/10.3390/molecules28165994>.

REMY, C.; ROIG, B.; ABOULFADL, K. 2019. Potable water reuse: A review of the main issues and challenges. *Sustainability*, 11(13), 3516.

REPANTIS, D., BOVY, L., OHLA, K. 2020. Cognitive enhancement effects of stimulants: a randomized controlled trial testing methylphenidate, modafinil, and caffeine. *Psychopharmacology* 238, 441–451 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00213-020-05691-w>.

REZENDE, A. 2022. **Avaliação de risco ambiental associado a produtos Farmacêuticos e desreguladores endócrinos em águas Superficiais brasileiras**. Dissertação (mestrado) apresentada à Universidade Federal de Viçosa, MG.

RIGUETO, C; ALESSANDRETTI, I; DETTMER, A. Remoção de contaminantes emergentes de águas residuais por adsorção: um review. In: **Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química**. Anais. Diamantina (MG) online, 2021.

ROBERTSON, W.; STEMPOORT, D.; SPOELSTRA, J.; BROWN, S.; SCHIFF, S. 2016. Degradation of sucralose in groundwater and implications for age dating contaminated groundwater. *Water Research*. Volume 88, January 2016, Pages 653-660.

RODRIGUES, I. O. (2011) Abrangência dos serviços de saneamento. In: IBGE (Ed.). **Atlas de Saneamento**. Rio de Janeiro: IBGE, p. 16.

RODRIGUEZ-MOZAZ, M., RICARTA, M., KÖCK-SCHULMEYER, H., GUASCH, C., BONNINEAUC, L., PROIAC, M., ALDAB, S., BARCELÓ, D., Pharmaceuticals and pesticides in reclaimed water: efficiency assessment of a microfiltration–reverse osmosis (MF–RO) pilot plant, *Journal of Hazardous Materials*, 282 (2015) 165-173.

SAMUEL, P. Alternativas Sustentáveis de Tratamento de Esgotos Sanitários Urbanos, **Através de Sistemas Descentralizados, para Municípios de Pequeno Porte**. Porto Alegre. 2011.

SANCHEZ-FLORES, R.; CONNER, A.; KAISER, R. A. 2016 The regulatory framework of reclaimed wastewater for potable reuse in the United States. *International Journal of Water Resources Development* 32 (4), 536–558. doi 10.1080/07900627.2015.112931.

SANTOS, A. S. P.; LIMA, M. A. M. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 2 - Aspectos legais relacionados ao reúso de águas como diretriz de institucionalização da prática no Brasil. **Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 15-27, 2022.

SANTOS, A. S. P.; VIEIRA, J. M. P. Reúso de água para o desenvolvimento sustentável: aspectos de regulamentação no Brasil e em Portugal. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 8, n. 1, p. 50–68, jul. 2020.

SANTOS, A; PACHAWO, V; MELO, M; VIEIRA, J. 2022. Progress on legal and practical aspects on water reuse with emphasis on drinking water – an overview. **Water Supply**. doi 10.2166/ws.2021.412.

SAPKOTA, A. R. Water reuse, food production and public health: Adopting transdisciplinary, systems-based approaches to achieve water and food security in a changing climate. **Environmental Research**, v. 171, p. 576–580, abr. 2019.

SILVA, A. **Educação para a sustentabilidade : contribuição do Instituto Federal de Alagoas para a conservação do rio São Francisco**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2018.

SOARES, S. R. A.; SANTOS, A. S. P. Priorização da água de reuso em bacias hidrográficas com base no planejamento de recursos hídricos: proposta metodológica e exemplos das bacias do Rio Grande e do Piancó-Piranhas-Açu. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 111–125, 2021. DOI: 10.9771/gesta.v9i2.43904. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/43904>. Acesso em: 11 fev. 2024.

SONG, S.; KANG, S.; PARK, S. 2022. **Association of Estrogen-Related Polygenetic Risk Scores with Breast Cancer and Interactions with Alcohol Intake, Early Menarche, and Nulligravida**. *Asian Pac J Cancer Prev*. 2022 Jan; 23(1): 13–24. doi 10.31557/APJCP.2022.23.1.13.

SORN, S.; HARA-YAMAMURA, H.; VET, S.; XIAO, M.; HOEK, E.; HONDA, R. 2023. Biological treatment of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) using microbial capsules of a polysulfone membrane. **Chemosphere**. Volume 329, July 2023, 138585.

SOUSA, A.; GOMES, J. 2019. **Desafios para o investimento público em saneamento no Brasil**. *Saúde debate* 43 (spe7) • 2019 • <https://doi.org/10.1590/0103-11042019S703>.

SHOUSHTARIAN, F.; NEGAHBAN-AZAR, M. Worldwide Regulations and Guidelines for Agricultural Water Reuse: A Critical Review. **Water**, v. 12, n. 4, p. 971, 29 mar. 2020.

SILVA, L. et al. Proposição de uma metodologia estruturada de avaliação do potencial regional de reúso de água: 03 – Metodologia de potencialidades (demandas e ofertas) e análise espacial. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, p. 36–54, 15 set. 2021.

SILVA, R. F.; SILVA, G. L.; SILVA, P. T. S.; SILVA, V. L. Identificação e Quantificação de Contaminantes Emergentes em Estações de Tratamento de Esgoto. **Rev. Virtual Quim.**, v. 8. n. 3. p. 702-715, 2016.

SONG, S.; KANG, S.; PARK, S. 2022. **Association of Estrogen-Related Polygenetic Risk Scores with Breast Cancer and Interactions with Alcohol Intake, Early Menarche, and Nulligravida**. *Asian Pac J Cancer Prev*. 2022 Jan; 23(1): 13–24. doi 10.31557/APJCP.2022.23.1.13.

SORN, S.; HARA-YAMAMURA, H.; VET, S.; XIAO, M.; HOEK, E.; HONDA, R. 2023. Biological treatment of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) using microbial capsules of a polysulfone membrane. **Chemosphere**. Volume 329, July 2023, 138585.

TADKAEW, N.; HAI, F.; MCDONALD, J.; KHAN, S.; NGHIEM, L. 2011. Removal of trace organics by MBR treatment: The role of molecular properties. **Water Research**, Volume 45, Issue 8, April 2011, Pages 2439-2451.

TCHOBANOGLIOUS, G. **New directions for wastewater treatment in the 21st century**. Flotation 2012 Proceedings 6th International Conference on Flotation for Water and Wastewater Systems. **Anais...**New York, NY: International Water Association, 2012.

TEXAS. Direct Potable Reuse Resource Document. 2015. Direct Potable Reuse Resource Document, Volume 1 of 2. Acesso em: 20 jul. 2023.

UHR, J.G.Z, SCHMECHEL, M., UHR, D.A.P. (2016). Relação entre saneamento básico no Brasil e saúde da população sob a ótica das internações hospitalares por doenças de veiculação hídrica. **Revista de administração, contabilidade e economia da Fundace**, 7, 1-16.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Potable Reuse Compendium**. 2017. epa.gov/sites/default/files/2018-01/documents/potablereusecompendium_3.pdf 07 fev. 2024.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Framework for Drinking Water Treatment Process Optimization**. 2014. Optimization Program for Drinking Water Systems | US EPA Acesso em: 07 fev. 2024.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for Deriving Numerical National Water Quality Criteria for the Protection Of Aquatic Organisms and Their Uses**. 2010. Guidelines for Deriving Numerical National Water Quality Criteria for the Protection of Aquatic Organisms and Their Uses (epa.gov) Acesso em: 07 fev. 2024.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for Water Reuse - EPA/600/R-12/618**. Washington, D.C., 2012. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2022.

VIEIRA, J. M. P. Plano de segurança da água em mananciais de abastecimento de água para consumo humano. **Revista Eletrônica De Gestão E Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 1, p. 87–97, 2013.

VIEIRA, J. M. P. **Água e Saúde Pública**. 1. ed. [s.l.] Sílabo, 2018.

VIRGINIA. Water Reclamation and Reuse Regulation. 2008. 9VAC25-740-90. Minimum standard requirements for reuses of reclaimed water. (virginia.gov). Acesso em: 24 fev. 2022.

VON SPERLING, M. **Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 4ª Ed. - Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2011, 243p. WETZEL, R. G. Limnologia. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2011. 919 p.

WAN, Y., CHAI, B., WEI, Q., HAYAT, W., DANG, Z., LIU, Z. 17 α -ethynylestradiol and its two main conjugates in seven municipal wastewater treatment plants: Analytical method, their occurrence, removal and risk evaluation. **Science of The Total Environment**, v. 812, 2022. p. 152489. ISSN 0048-9697.

WANG, X., SUN, D.; YAO, T. 2016. **Climate change and global cycling of persistent organic pollutants: A review.** Sci. China Earth Sci. 59, 1899–1911. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5073-0>.

WARNER, W.; LICHA, T.; NÖDLER, K. 2019. Qualitative and quantitative use of micropollutants as source and process indicators. A review. **Science of the Total Environment** 686. 2019. 75-89.

WASHINGTON. **Reclaimed water use.** 2022. Chapter 173-219 WAC: (accessed 05 June 2023).

WATEREUSE ASSOCIATION. **Framework for Direct Potable Reuse.** 2015. Framework for Direct Potable Reuse | WaterReuse Association (accessed 05 June 2023).

WATER EUROPE. **A water smart society for a successful post COVID19 recovery plan.** Bruxelas, 2020. Disponível em: <<https://watereurope.eu/wp-content/uploads/2020/04/A-Water-Smart-Society-for-a-Successful-post-COVID19-recovery-plan.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2022.

WEN, L.; LIN, L.; TA-CHEN, S.; PAU-CHUNG, C.; CHIEN-YU, L. 2013. Association Between Serum Perfluorinated Chemicals and Thyroid Function in U.S. Adults: The National Health and Nutrition Examination Survey 2007–2010. **The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism**, Volume 98, Issue 9, 1 September 2013, Pages E1456–E1464, <https://doi.org/10.1210/jc.2013-1282>.

WHO. **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater—Vol II—Wastewater Use in Agriculture**, 3rd ed.; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2006; Volume 2, ISBN 92-4-154683-2.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water.** 2017. Potable reuse (who.int). Acesso em: 6 nov. 2022.

WHO. **Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management.** [s.l.] World Health Organization, 2016.

WHO. **Summary Progress Update 2021: SDG 6 — water and sanitation for all.** Disponível em: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021a.pdf. Acesso em: 02 fev. 2024.

WWAP. **Wastewater: The Untapped Resource.** Paris, 2017.

XIAO, C., WANG, L., ZHOU, Q., HUANG, X. 2020. Hazards of bisphenol A (BPA) exposure: A systematic review of plant toxicology studies. **Journal of Hazardous Materials** Volume 384, 15 February 2020, 121488.

XU, A.; YIN-HU, W.; CHEN, Z.; WU, Q.; LING, F.; HUANG, W. E.; HU, H. **Towards the new era of wastewater treatment of China: Development history, current status, and future directions.** Water Cycle, v. 1, p. 80–87, 2020.

YOO, S.; LEE, S.; KIM, S. 2023. Acetaminophen adsorption to spherical carbons hydrothermally synthesized from sucrose: experimental, molecular, and mathematical modeling studies. **Environ Sci Pollut Res** 30, 49703–49719 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25815>.

ZANGO, Z.; KHOO, K.; GARBA, A.; KADIR, H.; USMAN, F.; ZANGO, M.; OH, W.; LIM, J. 2023. A review on superior advanced oxidation and photocatalytic degradation techniques for perfluorooctanoic acid (PFOA) elimination from wastewater. **Environmental Research** Volume 221, 15 March 2023, 115326.

ZHANG, S.; JIANG, X. 2023. Association between perfluoroalkyl substances exposure and the prevalence of nonalcoholic fatty liver disease in the different sexes: a study from the National Health and Nutrition Examination Survey 2005–2018. **Environ Sci Pollut Res** 30, 44292–44303 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25258-4>.

ZHENG, X., ZHANG, Z., YU, D., CHEN, X., CHENG, R., MIN, S., WANG, J., XIAO, Q., WANG, J. Overview of membrane technology applications for industrial wastewater treatment in China to increase water supply, **Resources, Conservation and Recycling**, 105 (2015) 1-10.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TTC 1 - A regulamentação dos poluentes emergentes no contexto internacional do reúso potável de água -----	101
APÊNDICE B – TTC 2 - Review on legal and practical aspects related to micropollutants in potable water reuse -----	109
APÊNDICE C – Regulated Micropollutants - Supplementary Material-----	131
APÊNDICE D – TTC 3 - Levantamento qualitativo sobre ocorrência de micropoluentes em matrizes aquosas brasileiras -----	138
APÊNDICE E – Material Suplementar (Busca 1 e 2) -----	152



A REGULAMENTAÇÃO DOS POLUENTES EMERGENTES NO CONTEXTO INTERNACIONAL DO REÚSO POTÁVEL DE ÁGUA

Mickaela Midon da Paixão⁽¹⁾

Engenheira Civil pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), assessora técnica da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, seção Rio de Janeiro (ABES-Rio). Mestranda em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

Renata de Oliveira Pereira⁽²⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Civil pela mesma instituição. Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professora associada da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

Ana Silvia Pereira Santos⁽³⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Doutora pela mesma instituição. Professora Adjunta da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Diretora Executiva do Instituto Reúso de Água

Endereço ⁽¹⁾: Praça Petrolândia, Casa 02 – Jardim Primavera - Duque de Caxias – RJ – CEP: 25223-450
Tel: (21) 98309-5480 - e-mail: mickaelapaixao@hotmail.com

RESUMO

Introdução: Um dos principais desafios científicos para a institucionalização do reúso potável de água é o risco sanitário em função da presença dos contaminantes de preocupação emergente, uma vez que a contaminação microbiológica é um problema cientificamente resolvido. **Métodos:** Neste contexto, o estudo avaliou o cenário global em relação à regulamentação para o reúso potável direto e indireto, destacando a preocupação com os poluentes emergentes em documentos legais mandatórios e orientativos não mandatórios. Para isso, foi utilizado o método de revisão da literatura, com um recorte temporal entre os anos de 2018 e 2022. **Resultados:** A análise dos artigos científicos selecionados gerou um entendimento amplo do cenário internacional de regulamentação de reúso potável. Posteriormente foram selecionados 18 documentos regulatórios relacionados ao reúso potável no mundo: 10 de caráter legal, 3 de caráter orientativo e 5 de duplo caráter. No total, somente 6 dos documentos analisados indicam padrões para poluentes emergentes, com destaques para diferentes classes, em função da abordagem, da modalidade e da região. **Conclusão:** Neste sentido, o reúso potável de água requer uma estrutura regulatória bem definida e adequada às características locais e regionais, de modo a permitir e orientar a sua aplicação de maneira segura. Aparentemente, a regulamentação da via indireta, anteriormente à via direta, parece ser um caminho mais acessível. Neste sentido, ganha-se experiência, enquanto a área científica apresenta resultados mais contundentes para novos avanços.

PALAVRAS-CHAVE: Água de Abastecimento, Desreguladores endócrinos, Microcontaminantes, Micropoluentes.



INTRODUÇÃO

A institucionalização da agenda 2030 pela Organização das Nações Unidas (ONU), criou 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como um plano de ação global, visando os aspectos humano, ambiental e econômico. O ODS 6 define metas e ações para garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos (ONU, 2015).

Dentre as soluções propostas para alcançar as metas do ODS6 encontra-se o reúso de água para consumo humano (reúso potável), que pode ser direto ou indireto. O reúso potável indireto (RPI) consiste no lançamento dos efluentes tratados em corpos d'água para que possam ser diluídos no manancial e captados a jusante, enquanto no reúso potável direto (RPD) os efluentes são encaminhados diretamente à ETA ou ao ponto de utilização (CETESB, 2022). Neste sentido, Hespanhol (2015) afirma que o reúso da água surge como uma alternativa para os sistemas de tratamento de água, principalmente em grandes regiões metropolitanas e em áreas com maior vulnerabilidade hídrica. Inclusive, Frijins et al. (2016) afirmam que a produção de água potável a partir de água para reúso pode ter um custo menor quando comparado ao custo de importação de água de áreas vizinhas e mais distantes.

Rachel Carson (1969), em seu livro “Primavera Silenciosa”, afirma que novos acontecimentos no mundo acompanham o ritmo insensato do ser humano em vez de seguir a velocidade de regeneração da natureza, permitindo a reposição de recursos fundamentais para a humanidade e para o ambiente. Rachel, referindo-se a produtos químicos que se disseminaram mundialmente, utiliza o termo “biocidas” aludindo ao dano que tais produtos podem causar à vida. Este conjunto de produtos químicos inclui fármacos, produtos de higiene pessoal ou doméstica, pesticidas, hormônios, compostos industriais, entre outros. Atualmente, estes compostos químicos são classificados de acordo com a USEPA (2014), como contaminantes de preocupação emergente. Estes contaminantes estão sendo detectados, cada vez mais, em baixos níveis em diversas matrizes ambientais. Há, neste caso, uma preocupação de que esses compostos possam ter um grande impacto no ambiente e segundo USGS (2019), o cenário se agrava quando a presença dessas substâncias em corpos d'água, compromete sua qualidade para consumo humano.

Dentro do grupo de poluentes emergentes há um conjunto de compostos que são capazes de alterar o sistema endócrino conhecido como: desreguladores endócrinos (DE). Esse grupo tem sido um dos mais estudados devido aos potenciais efeitos estrogênicos e carcinogênicos. O consumo de água contaminada é um dos fatores que permitem o contato dessas substâncias com o ser humano, visto que processos convencionais de tratamento de água não são capazes de eliminar a presença de parte considerável desse grupo (SANTOS *et al.*, 2021).

Atualmente, a discussão sobre a remoção de poluentes emergentes cresce de forma acentuada, em uma taxa de aproximadamente 17% por ano. A expressividade do tema cresce desde 2016, chegando ao auge em 2020. Entre os países que mais publicaram artigos sobre o assunto estão China, Espanha, Estados Unidos, Brasil e Portugal (RIGUETO, 2021).

A fim de reduzir o impacto de micropoluentes na saúde humana e no meio ambiente, há um crescente número de regulações para essa classe de poluentes (ALVES, 2016). No contexto do reúso potável são estas leis que autorizam e dão as condições mínimas para que se torne possível a distribuição e o consumo da água para reúso.

Nesse contexto, durante muitos anos, o principal problema em relação à água de abastecimento foi a contaminação fecal, associada à transmissão de diversas doenças de veiculação hídrica. Mais recentemente, os micropoluentes ganharam destaque, associados a outros tipos de comorbidades, conforme já mencionado.

Diante da problemática que envolve a escassez hídrica e os eventos cada vez mais severos de seca em várias regiões do mundo, os desafios futuros da água são muitos. Entre eles, destaca-se o abastecimento doméstico, por envolver maior rigor em relação à qualidade e apresentar demandas cada vez mais elevadas. Assim, o reúso de água para fins potáveis vem ganhando destaque nos últimos anos. No entanto, sua aplicação está associada a um elevado risco de saúde pública, considerando-se que esta é para ingestão. O problema da contaminação fecal é cientificamente resolvido, embora as aplicações práticas em todo o mundo ainda sejam deficitárias. Porém a questão dos micropoluentes é urgente.



OBJETIVO

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é avaliar a regulamentação existente no mundo para o reúso potável direto e indireto, bem como documentos norteadores e orientativos institucionais, para o mesmo fim. Ainda, o trabalho destaca a participação dos micropoluentes nestes documentos, de forma a criar um cenário de entendimento mais amplo sobre essa abordagem na regulação mundial.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de uma intensa revisão da literatura sobre regulamentação de reúso potável de água no mundo, com o objetivo de delimitar padrões de qualidade de água para os principais poluentes emergentes. Para isto, foram considerados os seguintes principais aspectos, conforme demonstrado e detalhado na Figura 1.

- Busca de artigos científicos na base de dados do Google Acadêmico, considerando um recorte temporal desde 2018 até 20 de outubro de 2022;
- Triagem dos artigos selecionados, considerando, títulos e resumos relacionados ao tema da pesquisa;
- Identificação de países/regiões citados nos artigos selecionados, que atualmente regulam o reúso potável de água no mundo;
- Busca dos documentos reguladores oficiais de cada região que consideram padrões de controle para poluentes emergentes, em casos de reúso potável de água.

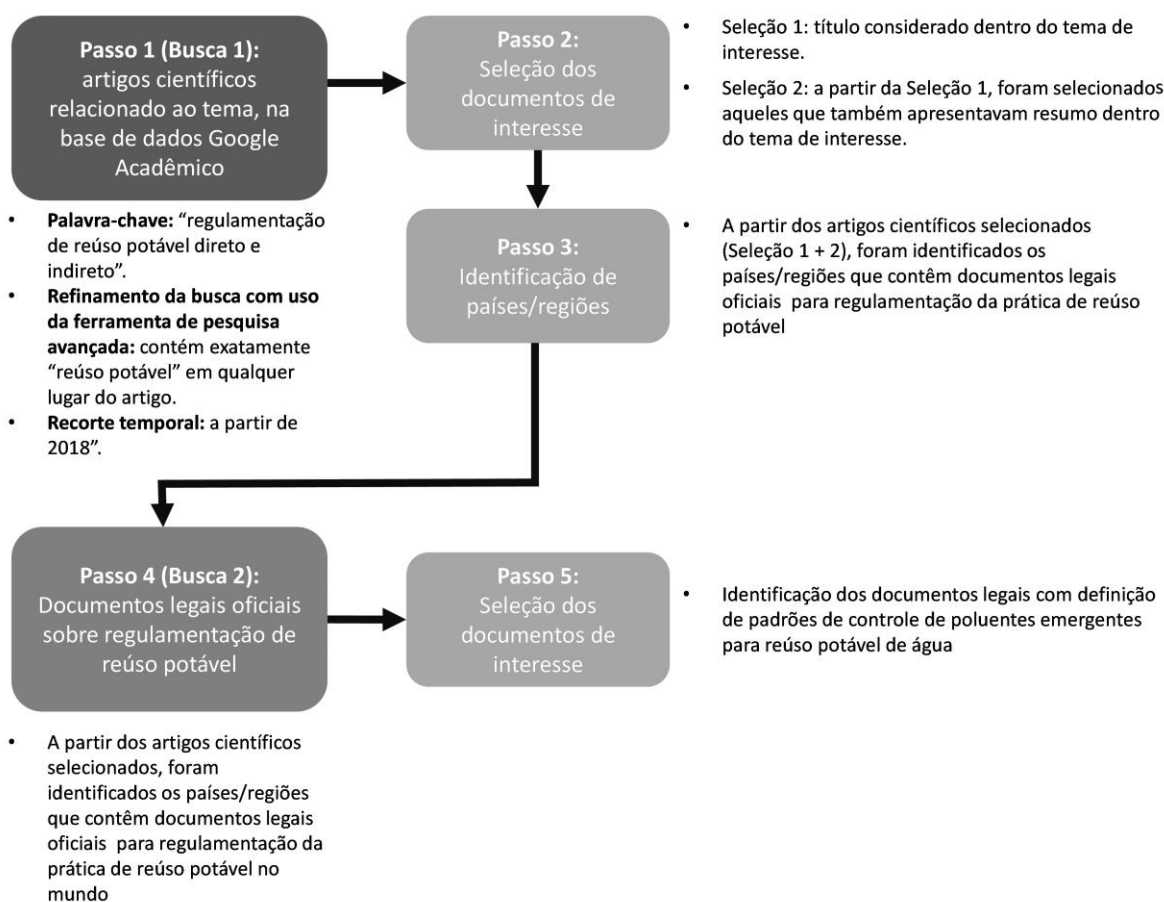


Figura 1: Descrição da metodologia utilizada para seleção dos documentos na revisão de literatura

Fonte: A autora (2022).

A partir do recorte metodológico apresentado na Figura 1 foi possível compreender o atual cenário regulatório de reúso potável de água no mundo. Após a leitura dos artigos, foi criada uma lista de países/regiões que regulamentam a prática, considerando tanto o direto como o indireto. Além da abordagem legal, foram identificados documentos orientativos de instituições internacionais que apresentam diretrizes e critérios para o mesmo fim, porém sem efeito legal. Completando a seleção inicial, foram incluídos outros documentos regulatórios, que não foram mencionados nos artigos selecionados, mas que eram de conhecimento prévio dos autores.

Para elaboração do conteúdo de discussão, foram então extraídas as seguintes informações dos documentos selecionados: 1) ano, 2) tipo de documento, 3) tipo de regulamentação (reuso direto, indireto ou ambos), e 4) em qual deles há regulamentação para poluentes emergentes.

RESULTADOS OBTIDOS

Conforme apresentado na Figura 2 foram encontrados, inicialmente, 110 artigos [Passo 1 (Busca 1) do recorte metodológico]. Dentre eles foram selecionados 16 artigos científicos contendo informações precisas de aspectos legais [Passo 2], que geraram o entendimento do cenário internacional de regulamentação de reúso potável [Passo 3]. Posteriormente foram selecionados documentos legais de interesse no tema [Passo 4], que levaram à definição de uma lista de 18 documentos orientativos e/ou regulatórios de reúso potável no mundo. Dentre eles, somente 6 adotam padrões de controle para poluentes emergentes.



Figura 2: Resultado da metodologia de busca e seleção de documentos

Fonte: A autora (2022).

Na Tabela 1 podem ser observados os 18 documentos resultantes da revisão da literatura, considerando ano de publicação, indicação para reúso potável direto (RPD) ou indireto (RPI) e, definição ou não de padrões de controle para poluentes emergentes, classificados em:

- Diretriz – para os documentos sem valor legal; ou
- Lei – para os documentos relacionados a atos legislativos.



Tabela 1: Documentos oficiais sobre reúso potável no mundo e a regulamentação de poluentes emergentes

Documento	Tipo de documento	Publicação	RPI	RPD	Padrões para poluentes emergentes
Namíbia	Diretriz e lei	1968	Não	Sim	Não
Novo México (EUA)	Lei	2001	Sim	Não	Não
Austrália	Diretriz e lei	2008	Sim	Não	Sim
Virgínia (EUA)	Lei	2008	Sim	Não	Não
Oregon (EUA)	Lei	2009	Sim	Sim	Não
Montana (EUA)	Lei	2009	Sim	Não	Não
Massachusetts (EUA)	Lei	2009	Sim	Não	Não
Carolina do Norte (EUA)	Lei	2011	Sim	Não	Não
EPA	Diretriz	2012	Não	Sim	Não
Pensilvânia (EUA)	Lei	2012	Sim	Não	Não
Texas (EUA)	Diretriz e lei	2015	Sim	Sim	Sim
WaterReuse	Diretriz	2015	Sim	Sim	Sim
OMS	Diretriz	2017	Sim	Sim	Sim
Califórnia (EUA)	Diretriz e lei	2018	Sim	Não	Sim
Nevada (EUA)	Lei	2018	Sim	Não	Não
Oklahoma (EUA)	Lei	2018	Sim	Não	Não
Flórida (EUA)	Diretriz e lei	2020	Sim	Não	Sim
Washington (EUA)	Lei	2022	Sim	Sim	Não

Legenda: RPI: reúso potável indireto; RPD: reúso potável direto; OMS – Organização Mundial de Saúde; EPA – Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos); WaterReuse Associação Norte-Americana. Fonte: a autora.

Com a observação da Tabela 1, os principais resultados obtidos são:

- Somente os documentos com valor legal (“lei” ou “diretriz e lei”) somam 15 documentos; enquanto outros considerados apenas diretrizes institucionais, somam 3.
- Daqueles documentos considerados “leis”, 14 regulam somente RPI e 1, regula somente RPD; 3 regulam ambas as práticas.
- No total, somente 6 dos documentos analisados indicam padrões para poluentes emergentes; destes, 4 são documentos legais e 2 são diretrizes.
- A maioria dos documentos analisados (12 deles) não indicam padrões para poluentes emergentes.
- São 2 os documentos específicos para RPD e nenhum deles estabelece valores para controle de poluentes emergentes. O primeiro é a legislação da Namíbia, criada em 1968, época em que o conhecimento científico sobre o tema ainda era limitado. O segundo, referente a diretrizes da USEPA (2021), versa somente sobre a importância do controle e monitoramento dos poluentes emergentes.

As Figuras 3 e 4 apresentam, juntas, um importante entendimento sobre o contexto da regulamentação do reúso potável. A Figura 3 mostra uma divisão dos regulamentos legais em relação ao tipo de reúso potável (direto/indireto); neste caso, observa-se que de maneira geral, o RPI tem abordagem mais ampla. Por outro lado, a Figura 4 mostra uma divisão dos regulamentos legais que indicam padrões para poluentes emergentes por tipo de reúso potável (direto/indireto); 75% deles são exclusivos para RPI e nenhum deles é somente para RPD.

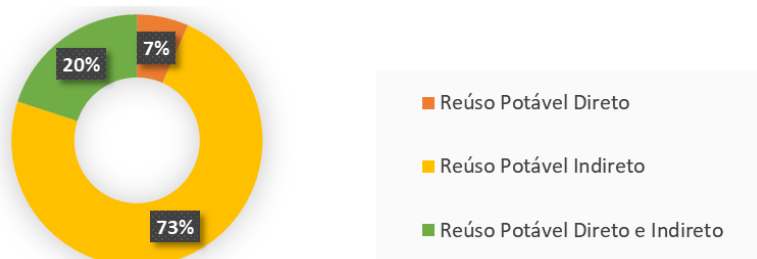


Figura 3: Documentos com valor legal em relação ao tipo de reúso potável

Fonte: A autora (2022)

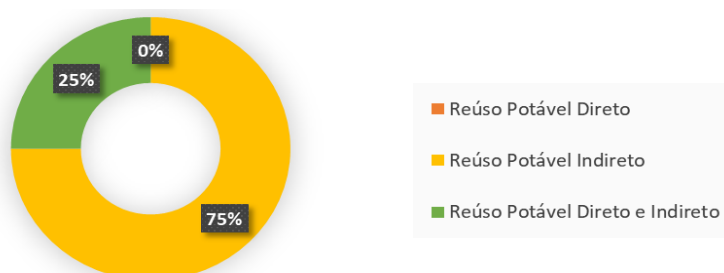


Figura 4: Padrões para poluentes emergentes por tipo de reúso potável

Fonte: A autora (2022)

Dos 18 documentos analisados, 3 regulam tanto reúso potável direto quanto indireto além dos documentos orientativos da OMS (2017) e WateReuse (2015) que dão diretrizes para ambos os tipos de reúso. Desses 5 documentos que abrangem os 2 tipos de reúso potável, somente o Texas (2015), OMS (2017) e WateReuse (2015) estipulam padrões para poluentes emergentes. Ao todo 11 documentos são específicos para reúso potável indireto, todos com poder legislativo. Destes, somente Califórnia (2018), Austrália (2008) e Flórida (2020) possuem parâmetros de controle para poluentes emergentes.

São 2 os documentos específicos para reúso potável direto e nenhum deles estabelece valores para controle de poluentes emergentes. O primeiro é a legislação da Namíbia, criada em 1968 época em que havia poucas pesquisas e o conhecimento científico sobre os poluentes de preocupação emergente e seus efeitos no sistema endócrino de certas classes desses compostos, ainda eram limitados. O segundo, composto pelas diretrizes da USEPA (2021), versa sobre a importância do controle e monitoramento dos poluentes emergentes, colocando em evidência o risco à saúde destes compostos no RPD. O documento cita as pesquisas e diretrizes utilizadas para a formulação das legislações da Austrália e Califórnia, porém a agência não estipula, por si só, valores de controle para tais compostos.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As instituições que publicaram diretrizes orientativas para a prática de reúso potável são: Organização Mundial da Saúde (OMS), Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) e a Associação americana WateReuse. Estas diretrizes não possuem caráter mandatório; elas apenas sugerem parâmetros de controle e dão outras diretrizes para reúso potável.

O caso da Namíbia é emblemático, com a implantação da primeira planta (Gorengab) de reúso potável direto do mundo, em 1968. A Gorengab foi projetada com o objetivo de cumprir critérios e diretrizes para água potável, definidos pela OMS, em 1963 (WHO, 2017), pois naquela época não havia legislação sobre o assunto. A Austrália foi o primeiro país a desenvolver Diretrizes Nacionais para reúso potável indireto (2008), com a criação da fase 2 das diretrizes australianas para a reúso de água (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2008). O documento inclui valores limites para a concentração de 86 produtos farmacêuticos em água para reúso.

Os EUA não possuem legislação federal referente ao reúso potável. No entanto, 13 dos seus estados já regulamentaram a prática, para reúso potável direto e indireto. O Texas foi o primeiro estado a regulamentar o



reúso potável direto, em 2015; mas neste caso, não indica padrões para poluentes emergentes. Riguetto (2021), mostra que o tema, de fato, ganhou expressividade em 2016.

O estado do Texas, e as instituições WateReuse e OMS são os únicos (dentre a base de dados consultada) que definem limites para poluentes emergentes (reúso direto e indireto), da seguinte forma:

- OMS: Dos 67 compostos, 19 são químicos industriais e 32 são pesticidas, deixando clara a sua preocupação com o controle de pesticidas.
- Texas: dos 19 compostos, os 4 fármacos e os 3 aditivos alimentares fazem desses grupos os de maior recorrência.
- WateReuse: os fármacos são a classe com mais compostos controlados, com 7 dos 17 indicados.

Os estados da Califórnia e Flórida, além da Austrália, definem padrões para poluentes emergentes somente para reúso potável indireto:

- Califórnia: dos 18 compostos, 8 são desreguladores endócrinos, fazendo com que este seja o grupo com maior presença.
- Austrália: documento com o maior número de compostos controlados (121); 86 são fármacos demonstrando preocupação com os seus efeitos
- Flórida: 10 dos 22 compostos listados também são fármacos.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Diante do exposto, observa-se claramente uma preocupação com a questão da regulamentação do reúso potável (direto ou indireto) e com a problemática que envolve os poluentes de preocupação emergente. No entanto, pelo fato de a discussão acerca destes compostos ser recente até mesmo para o abastecimento de água a partir de fontes convencionais, no caso das fontes de origem alternativa, como o reúso de água, os debates ainda são tímidos.

Países que vivem em situações de estresse hídrico, como Namíbia e Austrália, naturalmente protagonizaram o cenário de regularização da prática de reúso potável no mundo, estabelecendo seus documentos legais em 1968 e 2006, respectivamente. No entanto, somente a Austrália indica padrões para os compostos emergentes e somente para o reúso potável indireto

Nos EUA, somente os estados do Texas, Flórida e Califórnia definiram padrões para poluentes emergentes na prática de reúso potável, entre 2015 e 2020. Este cenário evidencia a escassez de legislações para o reúso potável, agravando-se a situação quando se discute em relação dos micropoluentes emergentes.

As classes em destaque considerando o reuso direto e indireto foram pesticidas, fármacos e químicos industriais. Já, para o reuso indireto houve uma predominância para a regulamentação do grupo dos fármacos, com a Califórnia salientando os compostos que causam desregulação endócrina.

Neste sentido, o reúso potável de água requer uma estrutura regulatória bem definida e adequada às características locais e regionais, de modo a permitir e orientar a sua aplicação de maneira segura. Em relação às demais modalidades de reúso de água, destaca-se a preocupação em relação aos poluentes emergentes que podem causar agravos à saúde dos usuários e beneficiados.

Outro destaque importante se relaciona à abordagem do reúso potável. É sabido que a prática por via indireta, conceitualmente oferece menor risco e neste sentido, as legislações e/ou diretrizes acabam sendo mais presentes para este caso. O reúso potável direto requer um rigor ainda maior. Aparentemente, a regulamentação da via indireta, anteriormente à via direta, parece ser um caminho mais acessível. Neste sentido, ganha-se experiência, enquanto a área científica apresenta resultados mais contundentes para novos avanços.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. Sobre normalização. Disponível em: <https://www.abnt.org.br/normalizacao/sobre>. Acesso em: 4 nov. 2022.
2. ALVES, T; GIRARDI, R; PINHEIRO, A. *Micropoluentes orgânicos: ocorrência, remoção e regulamentação*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319028922_Micropoluentes_organicos_ocorrencia_remocao_e_regulamentacao. Acesso em: 4 nov. 2022.
3. CALIFÓRNIA. Water quality control policy for recycled water. 2018.
4. CAROLINA DO NORTE. Reclaimed water. 2011.
5. CARSON, R. *Primavera Silenciosa*. 2ª edição. São Paulo: Portico, 1969.
6. CETESB. Reuso de água | Águas Interiores. 2022.
7. FLÓRIDA. Framework for the Implementation of Potable Reuse in Florida. 2020.
8. HESPANHOL, I. *Reúso potável direto e o desafio dos poluentes emergentes*. Revista USP, n. 106, p. 79-94, 2015.
9. MASSACHUSETTS. Reclaimed water permit program and standards. 2009.
10. MONTANA. Permitting and Operator Assistance. Disponível em: <https://deq.mt.gov/water/assistance>. Acesso em: 4 nov. 2022.
11. NEVADA. Water controls. Disponível em: <https://www.leg.state.nv.us/NAC/NAC-445A.html>. Acesso em: 4 nov. 2022.
12. NOVO MÉXICO. Natural resources and wildlife administration and use of water – General Provisions - Underground storage and recovery. 2001.
13. NRMHC-EPHC-NHMC. Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks: Phase 2. Canberra, Australia, 2008.
14. OKLAHOMA. Indirect potable reuse for surface water augmentation. 2018.
15. OREGON. Implementing Oregon's Recycled Water Rules. 2009.
16. PENNSYLVANIA. Pennsylvania Department of Environmental Protection. 2012.
17. RIGUETO, C; ALESSANDRETTI, I; DETTMER, A. *Remoção de contaminantes emergentes de águas residuais por adsorção: um review*. In: Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química. Anais. Diamantina (MG) online, 2021.
18. SANTOS, J; CORRÊA, L; FERNANDES, P; Bottrel, S; Pereira, R. *Avaliação preliminar da remoção de atividade estrogênica de uma mistura de desreguladores endócrinos em água utilizando carvão ativado granular*. Gesta, v. 9, n. 3, p. 92-107. 2021.
19. TEXAS. Direct Potable Reuse Resource Document. 2015.
20. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidelines for Water Reuse. 2012.
21. VIRGINIA. Water Reclamation and Reuse Regulation. 2008.
22. WASHINGTON. Reclaimed water use. 2022.
23. WATEREUSE ASSOCIATION. Framework for Direct Potable Reuse. 2015.
24. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water. 2017. Acesso em: 4 nov. 2022.

Review on legal and practical aspects related to micropollutants in potable water reuse

Mickaela Midon da Paixão^{*^}, Renata de Oliveira Pereira^{**}, Ana Silvia Pereira Santos^{***}

^{*} E-mail: mickaelapaixao@hotmail.com [^]Corresponding author

^{**} Postgraduate Program in Civil Engineering, Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Juiz de Fora, 36036-900, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brazil.
(E-mail: renata.pereira@ufjf.br) <https://orcid.org/0000-0002-3414-7292> (Orcid).

^{***} Department of Sanitary Engineering and Environment, University of State of Rio de Janeiro, 524 São Francisco Xavier St, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, 20550-900, Brazil.
(E-mail: ana.pereira@eng.uerj.br)

Abstract

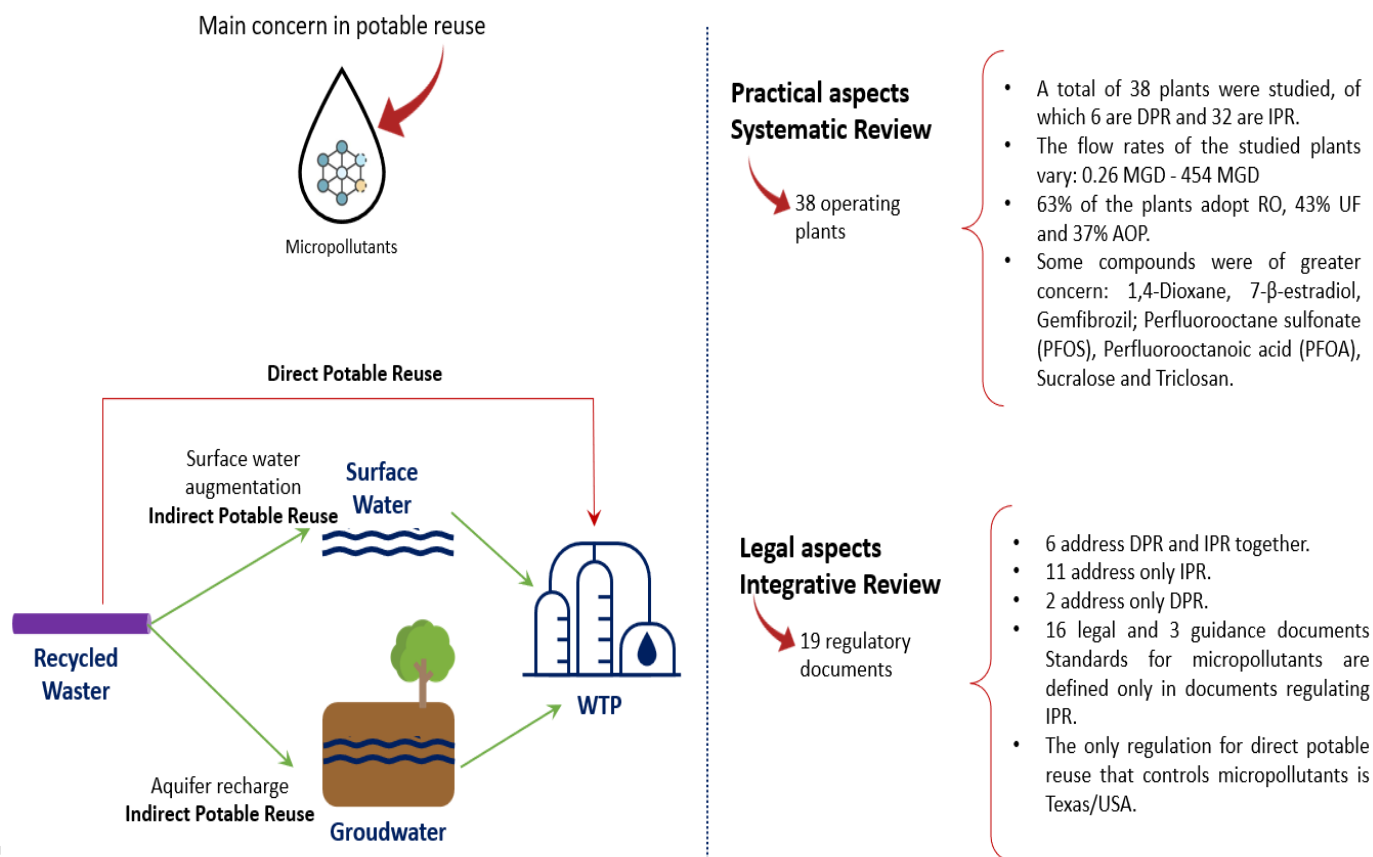
The presence of micropollutants in effluents leads to an increased concern regarding the application of recycled water for direct (DPR) and indirect potable reuse (IPR). The study presents a review (last 5 years) of the legal and practical aspects of potable reuse (PR) globally, focusing on micropollutants. The legal aspects were studied in an integrative literature review, while the practical aspects were studied in a systematic review, considering the plants currently operating in the world. The study contemplated 19 guiding documents, of which 6 address DPR and IPR jointly, 11 only IPR, and 2 only DPR. Standards for micropollutants are defined only in documents regulating IPR. Regarding plants in operation, 38 units were studied, of which 6 are DPR and 32 IPR. Some compounds presented more concern: 1,4-dioxane, 17- β -estradiol, gemfibrozil; perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA), sucralose and triclosan. It is of concern to note the absence of specific standards for micropollutants in DPR regulations. This gap underscores the importance of establishing rigorous guidelines that consider the efficient removal of micropollutants; the study guides advancing regional regulatory frameworks for the institutionalization of potable reuse worldwide.

Keywords

Contaminants of Emerging Concern; Regulation; Water Treatment Process; Standards; Potable Water Reuse; Regulatory Frameworks.

Highlights

- 1- This study is significant for its global perspective, covering legal and practical aspects, with the potential to drive water reuse regulations and address emerging contaminants for a sustainable future.
- 2- The study examines 38 operational water treatment units worldwide, encompassing both DPR and IPR systems. This analysis sheds light on the current state of water recycling infrastructure.
- 3- Specific micropollutants, such as 1,4-dioxane, 17- β -estradiol, gemfibrozil, PFOS, PFOA, sucralose, and triclosan, emerge as compounds of heightened concern in the context of potable reuse.
- 4- The absence of dedicated micropollutant standards within direct potable reuse regulations underscores a critical gap in addressing these contaminants.
- 5- This study advocates for the development of robust guidelines that prioritize efficient micropollutant removal, aiming to advance regional regulatory frameworks and the global institutionalization of potable reuse.



51 1. Introduction

52 To reduce the pressures of freshwater stress in different regions of the world, the solutions involve the use
 53 of water from alternative sources. Despite being renewable, quality, and potable water resources are scarce.
 54 In this context, water reuse emerges as a potential solution (MOURA *et al.*, 2020). Figure 1 shows how
 55 water reuse can be classified according to its multiple uses.

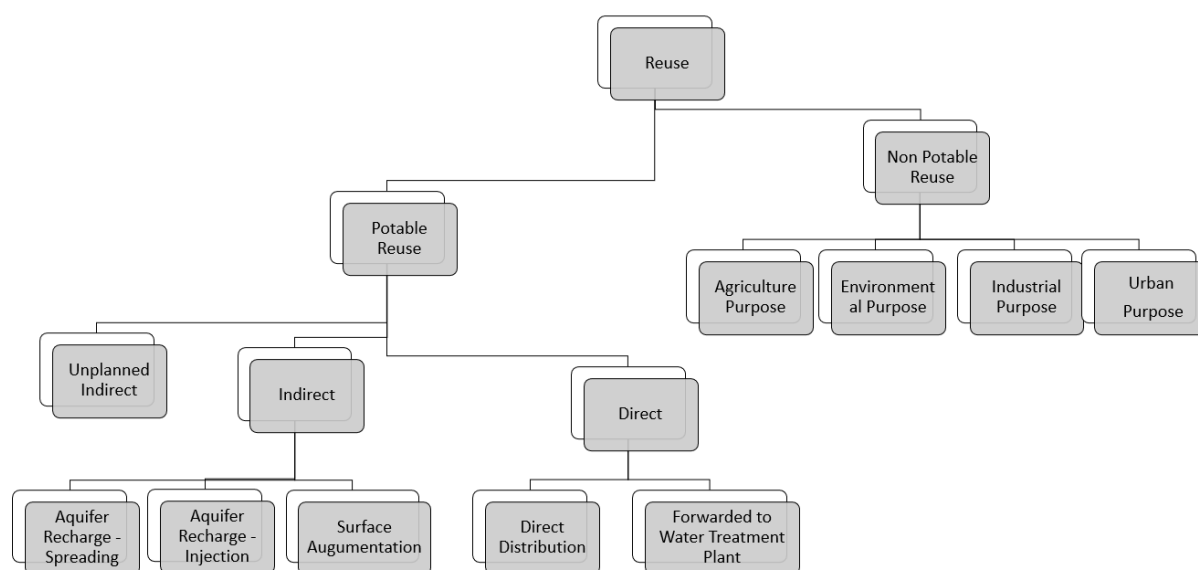


Figure 1 - Classification of water reuse

Non-potable reuse, which involves the use of treated effluent for purposes other than human consumption, has been widely adopted across all its categories. The level of effluent treatment varies depending on the intended use. When it comes to potable reuse, however, the concern becomes greater and public acceptability becomes lower. The World Health Organization (WHO, 2006), for example, did not recommend the practice of direct potable reuse, but this reality is changing worldwide, as will be discussed in this article.

A growing concern when it comes to potable reuse is the micropollutants or pollutants of emerging concern, which can have a major impact on the environment and health (HESPANHOL, 2015). These contaminants are increasingly being detected at low levels in various environmental matrices, and come from chemical compounds present in pharmaceuticals, personal or household hygiene products, pesticides, hormones, industrial products, and others (USEPA, 2010).

To mitigate the adverse effects of micropollutants on both human well-being and the environment, a growing body of regulatory measures is emerging. These regulatory frameworks cover legal considerations, incorporating both mandatory and non-mandatory benchmarks for compliance. The criteria, developed through the utilization of existing data and scientific expertise, serve as authoritative standards, regulations, or directives established by a governing body. Guidelines, on the other hand, are optional, advisory, and non-binding directives that serve as precursors to the establishment of formal standards or regulations. The formal incorporation of criteria or guidelines into law constitutes the process of regulation (SANTOS *et al.*, 2022). Thus, in addition to laws, there are guiding documents that involve the voluntary indication of standards, by important global institutions and consolidated in the subject.

To accomplish this regulation, control parameters were created that can be classified into parameters aimed at protecting human health or efficiency parameters. In the first case, they refer to substances and microorganisms that can be harmful to human health, such as pathogenic bacteria, viruses, parasites, toxic chemicals, and heavy metals, these parameters are critical to ensure that the reused drinking water is safe for human consumption. In the second case, these parameters measure the treatment technology's effectiveness in removing pollutants from water or wastewater on a case-by-case basis. This includes the efficiency of the filtration process, removal of suspended solids, removal of organic compounds, etc. These parameters are important to ensure that the treatment technology used is effective in producing high-quality drinking water (USEPA, 2014).

In this context, the objective of this article is to present a literature review study on the legal and practical advances related to the regulation of potable reuse in the world, considering the emerging pollutants of concern used in the control of sanitary safety. In the case of legal aspects, the work sought to present a contextualization of the regions of the world (countries and states) that have regulations or a guide on potable water reuse, focusing on the determination of standards and criteria for micropollutants. To give consistency to the legal basis, state-of-the-art of potable water reuse projects in operation in these regions is also presented, pointing out the practical advances.

2. Methods

The present work was developed from a mix of systematic review and literature review. The systematic review was adopted to list the potable reuse plants in operation. The literature review was adopted for the integration of potable water reuse regulations in the world, to delineate water quality standards for the main emerging pollutants. For both, the following main aspects were considered:

2.1. Potable reuse plants in operation worldwide - Systematic Review:

- Search for scientific articles in Google Academic and Scopus databases, considering a time frame from 2018 to September 30, 2023;
- Screening of the selected articles, considering, titles and abstracts related to the research topic that was potable reuse plants in operation worldwide;
- Selection of articles that contain in their text information on reuse plants in operation, such as location, treatment technologies and year of implementation;
- Identification of potable reuse plants which are currently in operation in the world, from a complete reading of the selected articles.

109 The following information was extracted from the selected articles for the construction of the discussion
110 content:

- 111 1) Plant location;
- 112 2) Type of reuse;
- 113 3) Flow rate;
- 114 4) Operation start date; and
- 115 5) Type of treatment used.

116 2.2. Regulatory aspects about micropollutants in potable reuse - Integrative Literature Review:

- 117 - Search for scientific articles in the Google Scholar database - Google Scholar encompasses major
- 118 international scientific databases and is a widely used search tool in the academic community (CANTO *et*
- 119 *al.*, 2023), considering a time frame from 2018 to September 30, 2023.
- 120 - Screening of the selected articles, considering titles and abstracts related to the regulatory aspects about
- 121 micropollutants in potable reuse;
- 122 - Identification of countries/regions cited in the selected articles, which currently regulate potable water
- 123 reuse in the world, from a complete reading of the selected articles;
- 124 - Search for the official regulatory documents or guiding documents of each region that consider control
- 125 standards for emerging pollutants in cases of potable water reuse.

126 From the methodological cut presented, it was possible to understand the current regulatory scenario of
127 potable water reuse in the world, besides having a list of potable reuse plants in operation. After reading
128 the articles, a list of countries/regions that regulate the practice, both directly and indirectly, was created.
129 In addition to the legal approach, orientation documents from international institutions were identified that
130 present guidelines and criteria for the same purpose, but without regulatory effect. Completing the initial
131 selection, other regulatory documents were included, which were not mentioned in the selected articles, but
132 were previously known to the authors.

133 It is important to highlight that throughout the world, water reuse has been regulated since 1918 and many
134 countries already practice it. However, the most common application is for agricultural irrigation purposes,
135 including legal documents already consolidated, (Santos, *et al.* 2022), but which generally do not involve
136 micropollutants of emerging concern. The focus of this article is potable reuse and regulatory/guiding
137 documents involving micropollutants.

138 To elaborate on the discussion content, the following information was then extracted from the selected
139 documents:

- 140 1) Year of document publication;
- 141 2) Type of document (mandatory or not);
- 142 3) Type of practice regulated (direct reuse, indirect reuse, or both);
- 143 4) Existence or absence of regulation/guide for emerging pollutants;
- 144 5) Basis for regulation: health or efficiency, in addition to the methodology for calculation; and
- 145 6) Guideline value or maximum allowed value of the emerging pollutant.

147 3. Results and Discussion

148 3.1. Potable reuse plants in operation worldwide

149 As a result of the systematic review, 38 potable water reuse plants in operation worldwide were found,
150 mostly located in the United States of America. Figure 2 lists these plants, classifying them into direct and
151 indirect potable reuse, and indicates whether there are regulations for potable reuse in that country/region.

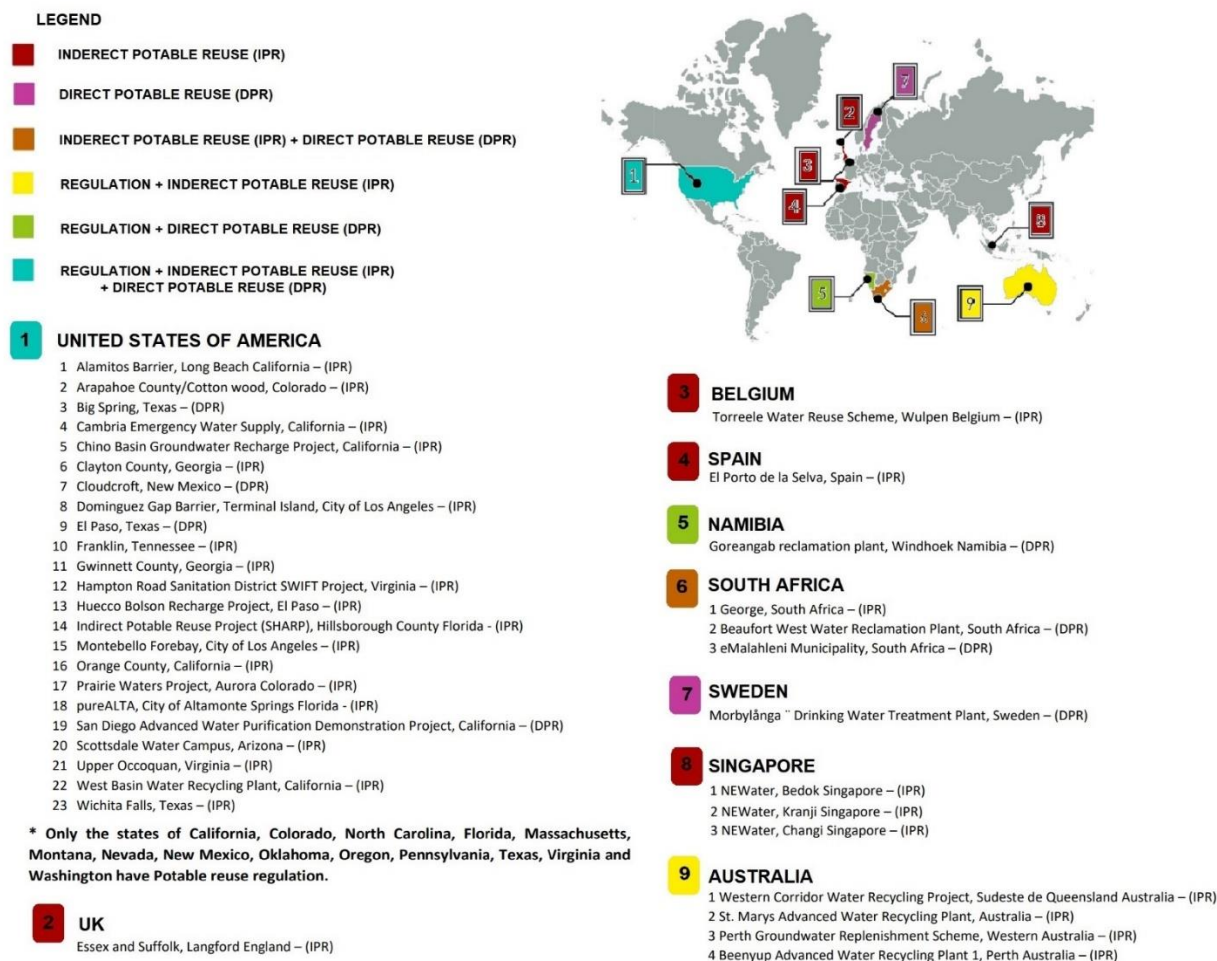


Figure 2 - Potable water reuse plants around the world with emphasis on the type (direct, indirect, or both) and the presence of regulations for the practice.

Among the 38 potable reuse plants, 23 are in the United States of America, 4 in Australia, 3 in Singapore, and 3 in South Africa. The United Kingdom, Belgium, Spain, Namibia, and Sweden each operate one plant.

Most of the plants are of indirect potable reuse, accounting for 30 of the 38. Only 18 operate in a country/region with regulations for this process. Of the 8 direct potable reuse plants, only 3 are not supported by a specific regulation for potable water reuse.

Table 1 shows the year the reuse plants were inaugurated, the type of reuse adopted, their capacity, and the treatment process used in each of the 38 plants currently operating.

162

Table 1 – Potable Reuse Plants in Operation

163 164	YEAR OF INSTALLATION	PLANT	TYPE OF REUSE	CAPACITY (MGD)	PROCESS	REFERENCE
165	1962	Montebello Forebay, County Sanitation Districts of Los Angeles County	IPR: ARS	166	Media Filtration → Cl	01, 02, 03, 07
166	1969 e 2002	Windhoek, Namibia, Goreangab reclamation plant	DPR: FWTP	5.5	PAC → O3 → Clarification → DAF → Sand Filtration → O3/AOP → BAC/GAC → UF → Cl	01, 02, 03, 04, 05, 06
167	1978	Upper Occoquan Service Authority potable reuse project in Virginia	IPR: SA	204	LC → Media Filtration → GAC → IX → Cl	01, 02, 03, 06, 07
168	1985	Clayton County, Georgia	IPR: SA	68	Cl → UV	01, 02, 07
169	1985	Huecco Bolson Recharge Project, El Paso Water Utilities	IPR: ARI	38	LC → Media Filtration → O3 → GAC → O3 → Cl	01, 02, 07
170	1995	West Basin Water Recycling Plant, California	IPR: ARI	66	O3 → MF → RO → UV/AOP	01, 02, 07
171	1999	Gwinnett County, Georgia	IPR: SA	227	UF → O3 → GAC	01, 02, 07
172	1999	Scottsdale Water Campus, Arizona	IPR: ARI	76	Media Filtration → MF → RO → UV	01, 02, 07
173	2002	Dominguez Gap Barrier, Terminal Island, City of Los Angeles	IPR: ARI	23	Media Filtration → MF → RO → UV/AOP	01, 02, 07
174	2002	Torreele Water Reuse Scheme, Wulpen - Belgium	IPR: SA	8	Biological Filtration → UV disinfection	01, 02, 03
175	2003	NEWater, Bedok - Singapore	IPR: SA	87	UF → RO → UV	01, 02, 03, 06
176	2003	Essex and Suffolk, Langford	IPR: SA	30	Biological Filtration → UV disinfection	01, 02, 03
177	2003	NEWater, Kranji - Singapore	IPR: SA	57	UF → RO → UV	01, 02, 03, 06

178	2005	Alamitos Barrier, Water Replenishment District of So. CA, Long Beach	IPR: ARI	30	Media Filtration → MF → RO → UV/AOP	01, 02, 07
179	2007	Chino Basin Groundwater Recharge Project, Inland Empire Utility Agency	IPR: ARS	68	Media Filtration → Cl	01, 02, 07
180	2007	eMalahleni Municipality, South Africa	DPR: FWTP	60	High Recovery Precipitating Reverse Osmosis (HiPRO) → MBR	06
181	2007	San Diego Advanced Water Purification Demonstration Project	DPR + SA	68	MF → RO → UV/AOP	01, 02, 07
182	2008	Orange County, California	IPR: ARS and ARI	378	UF → RO → UV/AOP	01, 02, 03, 06, 07
183	2009	Arapahoe County/Cottonwood, Colorado	IPR: SA	34	Media Filtration → RO → UV/AOP → Cl	01, 02, 07
184	2009	Western Corridor Water Recycling Project, South-East Queensland Australia	IPR: SA	61	UF → RO → UV/AOP	01, 02, 03
185	2009	George, South Africa	IPR: SA	10	Drum Screen → UF → Cl	01, 02
186	2010	Prairie Waters Project, Aurora - Colorado	IPR: SPR	189	Riverbank Filtration → ASR → Softening → UV/AOP → BAC → GAC → Cl	01, 02, 07
187	2010	St. Marys Advanced Water Recycling Plant, Australia	IPR: SA	211	UF → RO → UV	01, 03
188	2010	NEWater, Changi - Singapore	IPR: SA	122	UF → RO → UV	01, 02
189	2011	Beaufort West Water Reclamation Plant, South Africa	DPR: FWTP	0.26	Sand Filtration → UF → RO → UV/AOP → Cl	01, 02, 03, 04, 05
190	2013	Big Spring, Texas, USA	DPR: FWTP	7	MF → RO → UV/AOP → Conventional Treatment	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07
191	2014	Perth Groundwater Replenishment Scheme, Western Australia	IPR: ARI	10	UF → RO → UV	03
192	2014	Cambria Emergency Water Supply	IPR: ARI	2	UF → RO → UV/AOP	01, 02, 07

193	2014	Wichita Falls, Texas (Temporary DPR, long-term IPR implemented in 2015)	IPR: ARI	26	MF → RO → UV → Storage	01, 02, 03, 05, 07
194	2015	El Porto de la Selva - Spain	IPR: ARS	2.5	Media filtration → UV	01, 03
195	2015	Indirect Potable Reuse Project (SHARP), Hillsborough County Florida	IPR: ARI	2	UF → RO → UV	07
196	2016	Cloudcroft, New Mexico, EUA	DPR: FWTP	0.026	MBR → RO → UV/AOP → Storage	01, 02, 04, 05, 07
197	2016	Beenyup Advanced Water Recycling Plant 1, Perth - Australia	IPR: ARI	10	UF → RO → UV	01, 02, 06
198	2016	pureALTA, City of Altamonte Springs Florida	IPR: SA	20	UF → RO → UV	07
199	2018	Franklin, Tennessee	IPR: SA	30	MBR → O3 → GAC → Cl	01, 02
200	2019	Morbylångå - Drinking Water Treatment Plant - Sweden	DPR: FWTP	4	Drum Screen → Coag/floc → DAF → SBR → CSF → Coag → UF → UV	01
201	2020	Hampton Road Sanitation District SWIFT project	IPR: ARI	454	MBR → RO → UV → Cl	01,02
202	2023	El Paso, Texas	DPR: FWTP	38	MF → RO → UV/AOP → GAC → Cl	01, 02, 05, 07

Abbreviations used for technologies: ARI – Aquifer Recharge by Injection; ARS - Aquifer Recharge by Spreading; AOP – Advanced Oxidation Processes; BAC – Biological Activated Carbon; BW desalinated brackish water; Cl - Chlorination; C/AWT conventional/advanced water treatment; CSF continuous sand filtration; DAF – Dissolved Air Flotation; DI – Direct Distribution; DPR – Direct Potable Reuse; FWTP – Forwarded to Water Treatment Plant; GAC- Granular Activated Carbon; IPR – Indirect Potable Reuse; IX – Ion Exchange; LC – Lime Clarification; MBR – Membrane Bioreactor; MF - Microfiltration; SPR – Surface Potable Reuse; O3 – Ozone Disinfection; PAC – Powdered Activated Carbon; RO – Reverse Osmosis; UF - Ultrafiltration; UV – Ultraviolet Radiation.

01 – (JEFFREY *et al.*, 2022), 02 – (USEPA, 2017), 03 - (SANTOS *et al.*, 2022), 04 – (HESPANHOL, 2015), 05 – (LAHNSTEINER *et al.*, 2018), 06 - (WHO, 2017), 07 – (FLORIDA, 2020).

The 3 largest plants in terms of flow, perform indirect potable reuse. The Hampton Roads Sanitation District SWIFT project which has been operating since 2020, has the highest flow rate among the 38 in operation with 454 MGD, followed by Orange County, California with 378 MGD and Gwinnett County, Georgia with 227 MGD.

According to Kaur *et al.* (2022) reverse osmosis water treatment emerged in the mid-1950s, but did not become commercially available until the 1970s. Water treatment by ultrafiltration, on the other hand, emerged in the 1960s and became commercially available in the 1980s. This scenario explains the increasing use of membrane technology in potable reuse starting in 1995 at the West Basin Water Recycling Plant, California. The use of both technologies has grown since then, making them the most widely used among the plants in operation today. Reverse osmosis is the most widely used treatment, being present in about 63% of the plants, followed by ultrafiltration at about 42% and AOP present at about 37%.

According to Lin *et al.* (2022), advanced oxidation processes (AOP) is a highly efficient process regarding the removal of micropollutants, which explains their increasing use in operating plants. A solution to ensure the almost complete removal of micropollutants would be effluent purification by AOPs and high-retention membranes in a complementary manner to MBR (LIU *et al.*, 2022).

Of the 8 direct potable reuse plants, 5 use a combination of UF, RO, and AOP. One uses a combination of AOP and UF, another uses only RO, and the last uses only UF considering the 3 most recurrent technologies.

On the other hand, powdered activated carbon, dissolved air flotation, and biological activated carbon are the least used treatments. Only the Windhoek, Namibia, and Goreangab reclamation plant uses PAC and BAC. DAF is used at both Morbylångå Drinking Water Treatment Plant - Sweden and Windhoek, Namibia, Goreangab reclamation plant.

3.2. Regulatory aspects about micropollutants in potable reuse

As a result of the integrative review, 110 articles were initially found, based on the methodology described. However, only 16 scientific articles containing precise information on legal aspects were selected. With this step, it was possible to generate a general understanding of the international scenario on potable water reuse regulation and select the international legal documents of interest in the theme. As a result, a list of 19 guidance and/or regulatory documents on potable water reuse in the world was defined. Among them, only 6 adopt control standards for emerging pollutants.

Table 2 shows the 19 documents resulting from the literature review, considering the year of publication, indication for direct potable reuse (DPR) or indirect potable reuse (IPR), and definition or not of standards for emerging pollutants control. All of them are classified as "Guideline" when the document has no legal value, or "Law" when the document is related to legislative acts.

Table 2 - Regulatory documents (directive or law) on potable reuse (direct or indirect) in the world and the setting of standards for emerging pollutants

Publication Year	Region	Document Type	IPR	DPR	Standards for emerging pollutants
1968	Namibia	Guideline and law	No	Yes	No
2001	New Mexico (USA)	Law	Yes	No	No
2008	Australia	Guideline and law	Yes	No	Yes
2008	Virginia (USA)	Law	Yes	No	No
2009	Massachusetts (USA)	Law	Yes	No	No
2009	Montana (USA)	Law	Yes	No	No
2009	Oregon (USA)	Law	Yes	Yes	No
2011	North Carolina (USA)	Law	Yes	No	No
2012	Pennsylvania (USA)	Law	Yes	No	No
2015	Texas (USA)	Guideline and law	Yes	Yes	Yes
2015	Water Reuse	Guideline	Yes	Yes	Yes
2017	WHO	Guideline	Yes	Yes	Yes
2017	EPA	Guideline	Yes	Yes	No

2018	California (USA)	Guideline and law	Yes	No	Yes
2018	Nevada (USA)	Law	Yes	No	No
2020	Florida (USA)	Guideline and law	Yes	No	Yes
2022	Oklahoma (USA)	Guideline and law	Yes	No	Yes
2022	Washington (USA)	Law	Yes	Yes	No
2023	Colorado (USA)	Law	No	Yes	No

Legend: IPR: indirect potable reuse; DPR: direct potable reuse; WHO - World Health Organization; EPA - Environmental Protection Agency; Wate Reuse Association of America.

The institutions that have published guidelines for the practice of potable reuse are World Health Organization (WHO), US Environmental Protection Agency (USEPA), and the American WateReuse Association. These guidelines have no mandatory character, they only suggest control parameters and give further guidelines for potable reuse.

From the results presented in Table 2, we observe an interaction between the general characteristics of the documents, such as documents that set criteria and standards only for IPR, only for DPR, or for both; documents that control or not the micropollutants; and documents that are considered legal or only guidelines. This interaction can be seen in Figure 3.

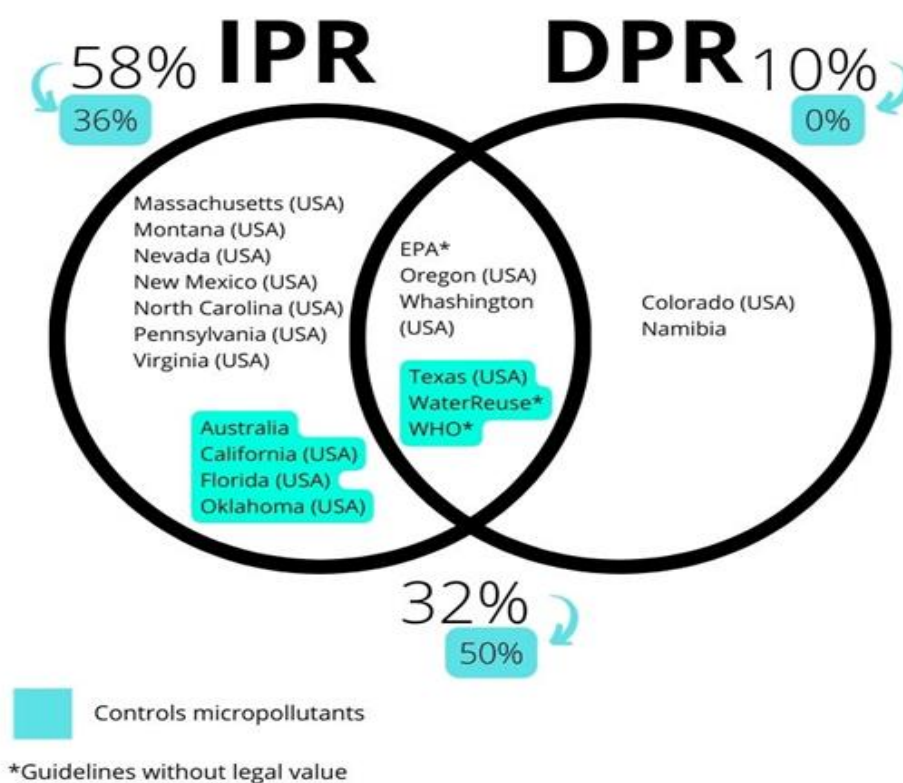


Figure 3 - Comparative diagram of regulations/guidelines according to the type of potable reuse and micropollutant control

Of the 19 documents reviewed, 3 regulate both DPR and IPR, in addition to the guidance documents from WHO (2017), WateReuse (2015), and USEPA (2017), which guide the practice for both. Of these 6 documents covering the 2 types of potable reuse, only Texas (2015), WHO (2017), and WateReuse (2015) stipulate standards for emerging pollutants. A total of 11 documents are specific to IPR, all with legislative power. Of these, only California (2018), Australia (2008), Florida (2020) and Oklahoma (2022) have control parameters for emerging pollutants.

There are 2 documents specific to DPR and neither sets values for control of emerging pollutants. The first is Namibia's legislation, created in 1968, a time when there was little research and scientific knowledge about pollutants of emerging concern, and their effects on the endocrine system of certain classes of these compounds were still limited. The second is the state of Colorado in the USA, which issued a resolution in 2023 that authorizes the practice of direct potable reuse but does not stipulate micropollutants standards control.

The Namibia's case is emblematic due the implementation of the world's first direct potable reuse plant (Gorengab) in 1968. The Gorengab was designed with the objective of meeting criteria and guidelines for drinking water, defined by the WHO in 1963 (WHO, 2017) because at that time there was no legislation on the subject.

Australia was the first country to develop National Guidelines for indirect potable reuse (2008), with the creation of phase 2 of the Australian guidelines for water reuse (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2008). The document includes limit values for the concentration of 86 pharmaceuticals in water for reuse.

The US does not have federal legislation regarding potable reuse, the country follows the USEPA (2012) guidelines and its compendium USEPA (2017). The agency verses in its documents about the importance of controlling and monitoring emerging pollutants, putting in evidence the health risk of these compounds in DPR. The document cites the research and guidelines used to formulate the legislation in Australia and California, however, the agency does not itself stipulate control values for such compounds. However, 14 of the 50 US states have already regulated the practice, for direct and/or indirect potable reuse. Oregon was the first state to regulate direct potable reuse, in 2009, but in this case, does not indicate emerging pollutants standards. Rigueto (2021), shows that the topic gained expressiveness in 2016.

The state of Texas, and the institutions WateReuse and WHO are the only ones (among the database consulted) that set emerging pollutants limits (direct and indirect reuse). WHO stood out with 67 compounds, of these 19 are industrial chemicals and 32 are pesticides, making clear their concern about pesticide control. Texas of the 19 compounds, the 4 pharmaceuticals and 3 food additives make these groups the most recurrent. Finally, WateReuse highlighted the pharmaceuticals class with 7 of the 17 listed.

The states of California and Florida, as well as Australia, set emerging pollutants standards for indirect potable reuse only. Australia highlighted with the highest number of controlled compounds (121); 86 are pharmaceuticals, showing concern about their effects. Oklahoma regulates 29 industrial chemicals compounds of 44. Florida has 10 of the 22 as pharmaceuticals compounds. California of the 18 compounds, 8 are endocrine disruptors, making this the group with the highest presence.

The behavior of these compounds can vary in different climates. In warmer, drier climates, for example, evaporation can cause a higher concentration of micropollutants in water bodies, while in colder climates, snow can act as a reservoir for these compounds, gradually releasing them into the water as the snow melts. In addition, the presence of micropollutants in water can be affected by the amount of rainfall, dilution, and other climatic factors. Therefore, it is important to understand how micropollutants behave in different climates to take effective measures to prevent their contamination of water (WANG *et al.*, 2016).

In addition to the climate issue, the different specifics in the regulations of pharmaceuticals and pesticides can vary significantly from country to country. Some countries may have a preference for certain drugs, while others may have restrictions or bans on the use of those same drugs. Similarly, some countries allow the use of certain pesticides that are prohibited in other parts of the world. These differences may be due to several reasons, including differences in legislation, environmental conditions, and cultural preferences, which result in different water micropollutants exposures (BOER *et al.*, 2023).

Figure 4 shows the amounts of micropollutants controlled in each of the studied documents that set standards for these compounds, by categories of micropollutants.

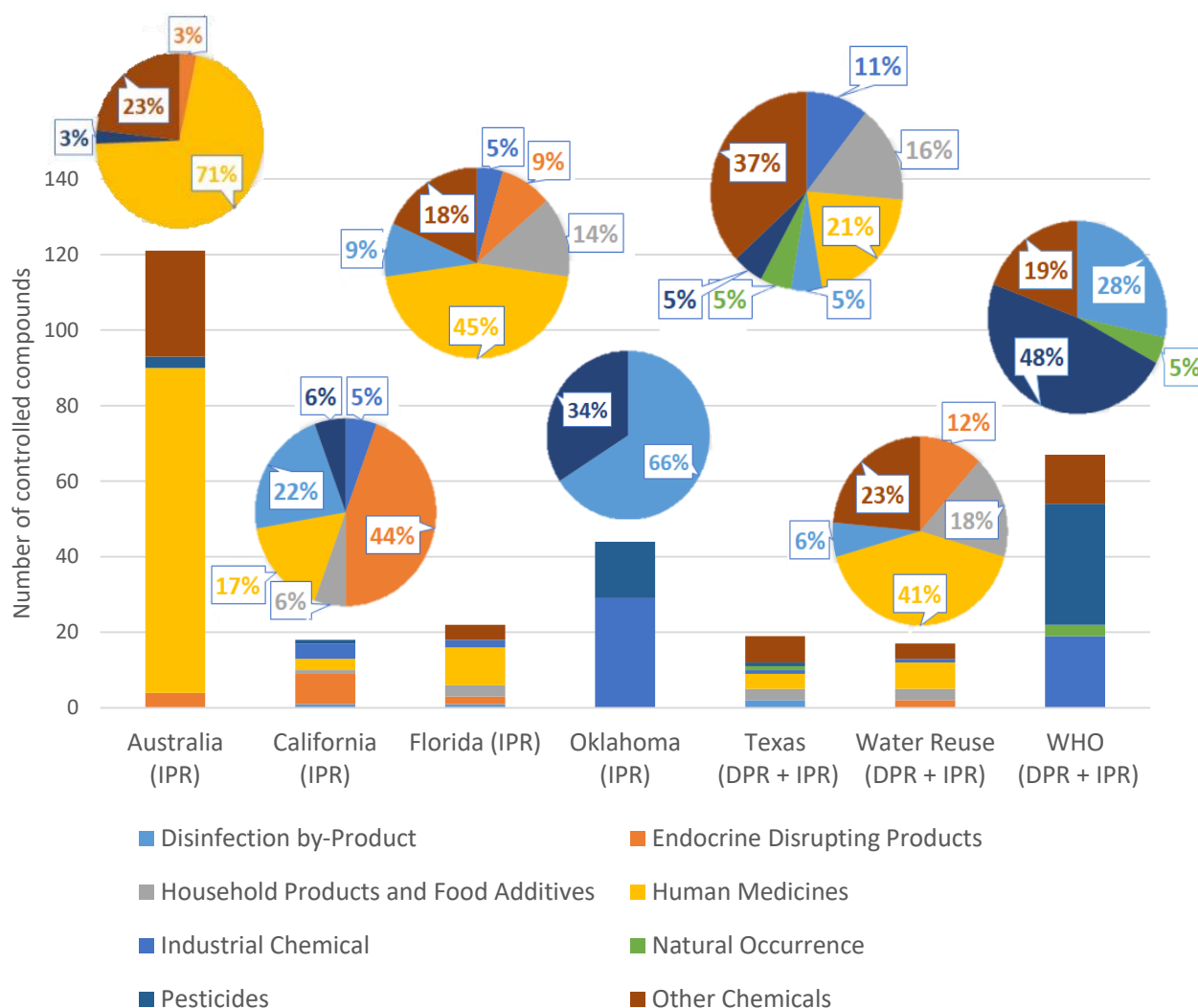


Figure 4 – Category of controlled micropollutants by country/region

Figure 4 illustrates the emphasis on pharmaceutical control, one of the most heavily regulated categories, alongside pesticides. These compounds are extensively used across different regions of the planet, and as mentioned earlier, they can be effectively removed with the use of suitable technological arrangements.

Altogether, in the 7 documents analyzed, there are 248 controlled pollutants of emerging concern. Among them, 49 are common to more than one document. Table 3 shows the list of compounds controlled in more than one regulation or guideline and makes the distinction between parameters aimed at protecting human health and treatment efficiency.

It is worth noting that the only regulation for direct potable reuse that controls emerging pollutants is the Texas regulation, since Water Reuse and WHO are only guidelines, with no legal character. All other regulations are for indirect potable reuse.

Constituent	WHO (DPR+IPR)	California (IPR)	Australia (IPR)	Texas (DPR+IPR)	Florida (IPR)	Oklahoma (IPR)	Water Reuse (DPR+IPR)
	Limit (µg/L)						
1,2-Dibromo-3-chloropropane	1					0.2	
1,2-Dichloroethane	30					5	
1,2-Dichloropropane	40					5	
1,4-Dioxane	50	0.1		0.032	0.1		1
17-β-estradiol			0.175	0.001	detection limit		detection limit
2,4,5-TP (Silvex)	9					50	
2,4-D	30					70	
Alachlor	20					2	
Atenolol				0.063	4		4
Atrazine	100					3	
Benzene	10					5	
Benzo(a)pyrene (PAHs)	0.7					0.2	
Bisphenol A		0.0005	200				
Caffeine			0.35	0.35			
Carbamazepine			100		10		10
Carbofuran	7					40	
Carbon Tetrachloride	4					5	
Cotinine			10		1		1
Di(2-ethylhexyl)phthalate	8					6	
Dichloromethane	20					5	
Dioxin *		0.0005	0.14				
Estradiol		0.0005	0.175				
Estrone			0.03		0.32		0.32
Ethinyl estradiol					detection limit		detection limit
Ethylbenzene	300					700	
Gemfibrozil		0.01	600	0.894	0.01		
Iohexol		0.05	720		0.05		

Iopromide			750	0.866			
Meprobamate				0.447	200		200
N,N-diethyl-metatoluamide				0.447	200		200
N-Nitrosodimethylamine (NDMA)	0.1	0.002			0.002		
N-Nitrosomorpholine (NMOR)		0.002	0.001		0.002		
Nonylphenol		0.0005	500				
Pentachlorophenol	9					1	
Perchlorate				0.122	6 15		6 15
Perfluorooctane sulfonate (PFOS)		0.0065		0.014	0.2		0.2
Perfluorooctanoic acid (PFOA)		0.007		0.02	0.4		0.4
Phenyltin					2		2
Primidone				0.1	10		10
Simazine	2					4	
Styrene	20					100	
Sucralose		0.1		1.247	0.1		0.000015
Sulfamethoxazole		0.01	35		0.01		
TCEP - Tris (2-chloroethyl) phosphate			1	0.071			
Toluene	700					1000	
Triclosan			0.35	1.449	2100		2100
Tris (2-Carboxyethyl) phosphine) hydrochloride					5		5
Vinyl chloride	0.3					2	
Xylenes	500					10000	
Performance							

¹ Australia uses a maximum value for the sum of all dioxin compounds while California restricts only Polychlorinated dibenzo-p-dioxins

² Xylenes in Oklahoma is the total value for the class

* 2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl (PCB156) 2,3,3',4,4'-pentachlorobiphenyl (PCB105) 2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl (PCB118) 2,4,5,3',4',5'-Hexachlorobiphenyl (PCB167) 2,7-Dichlorodibenzo-p-dioxin (DCDD) 3,4,5,3',4',5'-Hexachlorobiphenyl (PCB169) Octachlorodibenzo-p-dioxin (OCDD)

Of the 49 compounds present in Table 3, 16 are used as an efficiency parameter and 33 are used exclusively as a parameter aimed at protecting human health. The compound perchlorate has two control values (6 µg/L and 15 µg/L) both in Water Reuse and in Florida because one of them follows the calculation methodology used by the state of California (6 µg/L), which is given through risk assessment based on toxicity and human exposure. The other value (15 µg/L) follows the model adopted by the USEPA in the construction of its list of emerging contaminants for drinking water, not being specific for potable reuse, which explains the difference between the values.

The regulation of emerging pollutants created by Florida's state in 2020 was based on the standards indicated by Water Reuse in 2015. When analyzing Table 3, it is also possible to see that Texas's state has more restrictive pro-health parameters when compared to the other documents, which is consistent with the fact that it is the only one to regulate emerging pollutants for direct potable reuse.

The Oklahoma's state in 2022 was based on the WHO list of contaminants, but in defining its control parameters the state used the same method that Australia uses, based on the minimum therapeutic dose, which is the lowest dose of a compound capable of producing the desired effect. The WHO standards are based on quantitative chemical risk assessment, which is an analysis of the effects of chemical exposures on a population or environment. These 3 documents are the only ones not to use efficiency parameters, only pro-health ones.

It is not possible to say that one potable reuse legislation is more restrictive than another, as these regulations often control different compounds. Each legislation is developed considering the region-specific challenges and risks. Moreover, even when it comes to common compounds, it is not possible to establish a direct correlation between the restrictions imposed. Restriction criteria may vary according to factors such as the local context, available scientific knowledge, treatment technologies employed, and public health considerations. Therefore, it is essential to evaluate potable reuse legislation in its entirety, considering the compounds controlled and the targets set in each specific case.

Another information of importance that can be extracted from Table 3, is the seven most recurrent contaminants: 1,4-dioxane, 17-β-estradiol, gemfibrozil, perfluorooctane sulfonate (PFOs), perfluorooctanoic acid (PFOA), sucralose and triclosan. 1,4-Dioxane is present in 5 of the 7 documents (controlled exclusively as a parameter aimed at human health protection). 1,4-Dioxane, an organic compound classified as an industrial chemical, is mainly used as a solvent and stabilizer for other chemicals (OUYANG *et al.*, 2022). Its genotoxicity effects are controversial, according to the study by Demir (2022), the compound exerts toxic and genotoxic effects at low concentrations.

17-β-estradiol present in 4 of the 7 documents (controlled exclusively as a parameter aimed at human health protection). Natural estrogen has three forms: 17-β-estradiol, estriol, and estrone. Among them, 17-β-estradiol is functionally the most potent, being the main female sex hormone responsible for the development and regulation of the reproductive system and secondary sexual characteristics (LU *et al.*, 2023). 17-β-estradiol has several adverse effects on human health, which vary with the concentration of the compound and the duration of exposure. Its most common effects are: in high concentrations, it can act as an endocrine disruptor. This means that it can interfere with the normal functioning of the human endocrine system, affecting hormone regulation and hormone balance. It can affect the human reproductive system by interfering with normal hormonal function, causing menstrual disorders, reducing fertility, and affecting sperm quality in men. Exposure to 17-β-estradiol during pregnancy, even at low concentrations, may pose a risk to fetal development. It may affect the endocrine system of the developing fetus and have adverse effects on sexual and reproductive development. The presence of 17-β-estradiol in water can lead to several adverse effects, including changes in growth and development, metabolism, immune function, and other hormone-regulated processes. Some studies such as Jerry *et al.* (2018) and Song *et al.* (2022) suggest that high concentrations of 17-β-estradiol in water may be associated with an increased risk of developing certain types of cancer, such as breast, prostate, and ovarian cancer. However, more research is needed to establish a direct causal relationship.

Gemfibrozil is present in 4 of the 7 documents (as a parameter aimed at protecting human health and as an efficiency parameter). Gemfibrozil is a drug used to treat high levels of cholesterol and triglycerides in the blood (KAMAL *et al.*, 2023). The persistence of gemfibrozil was studied in the surface waters of Lake Maracaibo and Tule reservoir (Venezuela) under laboratory conditions, under sunlight the half-life time of the compound was 135 to 305 days. Its half-life time may be short when compared to other persistent compounds, but for its class of drugs that are highly biodegradable, gemfibrozil is considered to have the highest persistence in the aquatic environment, so it is used as an efficiency parameter (ARAUJO *et al.*, 2011).

PFOS is present in 4 of the 7 documents (controlled exclusively as a parameter aimed at protecting human health). It is a synthetic persistent organic substance used in many commercial and industrial products and causes severe and widespread adverse health impacts to humans and the environment, as it remains in the environment for long periods and can accumulate in human body tissues over time (SORN *et al.* 2023). In addition to being an endocrine disruptor, PFOS has been associated with toxic effects on the human liver, such as increased liver enzymes, hepatomegaly (increased liver size), and liver necrosis. The compound has also been associated with adverse effects on the human immune system (LIANG *et al.*, 2022). Some epidemiological studies such as Zhang *et al.* (2023) and Wen *et al.* (2013) suggest an association between PFOS exposure and increased risk of cardiovascular diseases such as high blood pressure, coronary artery disease, and stroke. PFOS exposure during pregnancy has been associated with adverse effects on child development. Studies suggest that high levels of PFOS exposure may be related to low birth weight, growth problems, and neurodevelopment in children (DALSAGER *et al.* 2016).

PFOA is present in 4 of the 7 documents (controlled exclusively as a parameter aimed at protecting human health). It is a synthetic chemical used in many products that are toxic and persistent in the environment and the human body. It has been identified as the most toxic species in the family of perfluorinated carboxylic acids (PFCAs). It has been widely distributed and frequently detected in environmental wastewater (ZANGO *et al.*, 2023). The adverse effects on the human body are similar to the effects of PFOS, being associated with toxic effects on the liver, endocrine system, immune system, reproductive system, and cardiovascular system (LIANG *et al.*, 2022).

Sucralose is present in 4 of the 7 documents (controlled exclusively as an efficiency parameter), it is an artificial sweetener, about 600 times sweeter than sugar, widely used in foods and beverages (YOO *et al.*, 2023). It persists during sewage treatment and in surface water environments, and as such has been suggested as a powerful wastewater marker. In a study, the long-term persistence of sucralose was examined in groundwater in Canada, from an evaluation conducted for 6 years, a half-life time of about 1 year was arrived at for the compound (ROBERTSON *et al.*, 2016).

Triclosan is present in 4 of the 7 documents (in Australia it is controlled as a parameter aimed at human health protection, in the others as an efficiency parameter). Triclosan is an antibacterial compound present in personal care and cleaning products, potentially harmful to health and the environment (CHEN *et al.*, 2023). It is an endocrine-disrupting compound and its increasing presence in water resources, its potential for bioaccumulation in fatty tissues, and its toxicity in aquatic organisms are of concern for human and environmental health. The compound has already been detected in the blood, breast milk, urine, and fingernails of humans. Triclosan is stable to hydrolysis, laboratory studies showed that it was stable at pH 4, 7, and 9, and is not expected to volatilize significantly, given its low vapor pressure of 4×10^{-6} mm Hg at 20 °C. However, with advanced treatment processes, microfiltration/nanofiltration with reverse osmosis, they achieved almost complete removal of the compound (OLANIYAN *et al.*, 2016).

Micropollutants are a powerful tool that can provide important information about aquatic systems, for example, changes in a watershed and processes such as their degradation. Their use as efficiency indicators in treatment processes to obtain qualitative and quantitative information opens up a wide spectrum of potential approaches (WARNER *et al.*, 2019).

The increasing use of micropollutants as indicators of efficiency in potable water reuse treatments is an increasingly common trend in the field of environmental engineering. Micropollutants such as gemfibrozil, sucralose, and triclosan are examples of micropollutants already used as indicators in potable reuse regulations. Analysis of these compounds can provide valuable information about the efficiency of treatment processes and allow for necessary adjustments to meet drinking water quality standards. Furthermore, the identification and monitoring of micropollutants are important for the establishment of regulations and guidelines for water treatment, which is fundamental to ensuring public health and environmental sustainability.

When contemplating direct potable reuse, countries must also adhere to drinking water regulations. These regulations may encompass the control of certain micropollutants, which necessitates careful analysis to ensure the production of safe reclaimed water for consumption. This dual compliance with both potable water and water reuse standards is imperative to safeguard public health and maintain the integrity of water reuse practices.

Aforementioned, potable reuse presents significant benefits, but also raises some concerns. Among the benefits, according to Gerrity *et al.* (2018) and Remy *et al.* (2019), is the conservation of water resources, as potable reuse allows for reduced demand on traditional freshwater sources. In addition, potable reuse contributes to water security by providing an additional source of drinking water in water-scarce regions.

However, as noted in the previous discussion, it is important to consider concerns relating to micropollutants, such as pharmaceuticals and persistent chemicals, which may not be completely removed by conventional treatment processes. These micropollutants may pose long-term risks to human health (PASSOS *et al.*, 2017). Furthermore, direct potable reuse, raises concerns related to public acceptance and confidence in water quality. Therefore, it is critical to implement advanced treatment technologies, such as micropollutant removal processes, to ensure that reused water meets rigorous quality and safety standards and that the practice of potable reuse is adopted sustainably and reliably (PICO *et al.*, 2018).

4. CONCLUSION

The study highlights the need for comprehensive regulations in the field of potable reuse, emphasizing the challenges posed by the absence of clear guidelines. It underscores the importance of ensuring the safety and quality of reused water while building public trust. The modernization of potable reuse plants with advanced technologies is seen as essential for producing safe drinking water and removing contaminants effectively. Additionally, the study addresses the increasing focus on micropollutants in regulations and the transition from indirect to direct potable reuse, emphasizing the urgency of establishing specific guidelines to tackle micropollutant challenges and safeguard public health. Although regulations for water reuse in other applications are consolidated in several regions of the world, potable reuse still requires adequate regulation for its consolidation.

This article aims to bridge the gap between technology and regulation, sparking a discussion on the imperative need to align policies with technological advancements. Technology often takes the lead as it is typically developed in technological centers, universities, and research institutions, whereas legislation depends on politics and decision-makers who may not always engage in meaningful dialogue with the academic community.

There is not one legislation superior to another among those presented in the study, what exists are regulations better suited to the unique circumstances of the different regions discussed. In order to address the issue of micropollutants effectively, it is imperative that each region examines the reality of its situation. This is because the uses and occurrences of micropollutants vary from one region to another.

Finally, it is important to define, according to the range of micropollutants regulated for potable reuse to date, those with the highest occurrence and/or most aggressive adverse effects on the environment and human health in each region. This study serves as a comprehensive compilation of scientific data, offering valuable assistance to the public sector in crafting effective legislation for the invaluable societal resource of water. By providing illustrative examples, policymakers and legislators can derive guidance for the formulation of region-specific regulations, ensuring that water management aligns seamlessly with the diverse needs of each locality.

5. REFERENCES

- Araujo, L.; Villa, N.; Camargo, N.; Bustos, M.; García, T.; Prieto, A. 2011. Persistence of gemfibrozil, naproxen, and mefenamic acid in natural waters. *Environmental Chemistry Letters* 9, 13–18 2011. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0239-5>.
- Boer, A.; Morvillo, M.; Rottger-Wirtz, S. 2023. Fragmented Transparency: The Visibility of Agency Science in European Union Risk Regulation. 2023.
- California. Water quality control policy for recycled water. 2018. [Water Quality Control Policy for Recycled Water \(ca.gov\)](#) (accessed 22 April 2023).
- Canto, F.; Pinto, A.; Dias, T.; Gavron, E.; Talau, M. 2023. Gsm_hdata: a bibliometric tool to analyze data from google scholar metrics. *Mobile Netw Appl* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11036-023-02258-9>.
- Chen, X.; Mou, L.; Qu, J.; Wu, L.; Liu, C. 2023. Adverse effects of triclosan exposure on health and potential molecular mechanisms. *Science of The Total Environment* Volume 879, 25 June 2023, 163068.

- 504 Dalsager, L.; Christensen, N.; Husby, S.; Kyhl, H.; Nielsen, F.; Grandjean, P.; Jensen, T. 2016. Association
505 between prenatal exposure to perfluorinated compounds and symptoms of infections at age 1–4 years among
359 children in the Odense Child Cohort. *Environment International*, Volume 96, November 2016, Pages 58-64.
506
- 507 Demir, T. 2022. In vivo effects of 1,4-dioxane on genotoxic parameters and behavioral alterations
508 in *Drosophila melanogaster*, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 85:10, 414-
509 430, DOI: 10.1080/15287394.2022.2027832.
510
- 511 Florida. Framework for the Implementation of Potable Reuse in Florida. 2020. Potable Reuse Chapter 62-
512 610 F.A.C. and Framework for the Implementation of Potable Reuse in Florida Crosswalk (floridadep.gov)
513 (accessed 22 April 2023).
514
- 515 Gerrity, D.; Tchobanoglous, G.; Simmons, J. 2018. Developing sustainable potable reuse regulations through
516 public health-based treatment targets. *Environmental Science & Technology*, 52(6), 3048-3058.
517
- 518 Hespanhol, I. 2015. Direct potable reuse and the challenge of emerging pollutants. *Revista USP - São Paulo*
519 - n. 106 - p. 79-94 - julho/agosto/setembro 2015 (In Portuguese).
520
- 521 Jeffrey, P.; Yang, Z.; Judd, S. 2022. The status of potable water reuse implementation. *Water Research* 214
522 (2022) 118198.
523
- 524 Jerry, D.; Shull, J.; Hadsell, D.; Karen, A.; Majhi, P.; Schneider, S.; Hadsell, D.; Hadsell, M.; Vandenberg,
525 L.; Byrne, C.; Trentham-Dietz, A. 2018. Genetic variation in sensitivity to estrogens and breast cancer risk.
526 *Mamm Genome* 29, 24–37. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00335-018-9741-z>.
527
- 528 Kamal, N.; Sindhu, R.; Bhargava, P. 2023. Biodegradation of emerging organic pollutant gemfibrozil:
529 Mechanism, kinetics and pathway modeling. *Bioresource Technology* Volume 374, April 2023, 128749.
530
- 531 Kaur, R.; Goyat, R.; Singh, J.; Umar, A.; Chaudhry, V.; Akbar, S. 2022. An Overview of Membrane
532 Distillation Technology: One of the Perfect Fighters for Desalination. *Engineered Science*.
533
- 534 Lahnsteiner, J.; Rensburg, P.; Esterhuizen, J. 2018. Direct potable reuse – a feasible water management
535 option. *Journal of Water Reuse and Desalination* - 08.1. 2018. doi 10.2166/wrd.2017.172.
536
- 537 Liang, L.; Pan, Y.; Bin, L.; Liu, Y.; Huang, W.; Li, R.; Lai, K. 2022. Immunotoxicity mechanisms of
538 perfluorinated compounds PFOA and PFOS. *Chemosphere* Volume 291, Part 2, March 2022, 132892.
539
- 540 Lin, W.; Liu, X.; Ding, A.; Ngo, H.; Zhang, R.; Nan, J.; Ma, J.; Li, G. 2022. Advanced oxidation processes
541 (AOPs)-based sludge conditioning for enhanced sludge dewatering and micropollutants removal: A critical
542 review. *Journal of Water Process Engineering*. Volume 45, February 2022, 102468.
543

- 544 Liu, W.; Song, X.; Huda, N.; Li, G.; Luo, W. 2020. Comparison between aerobic and anaerobic membrane
545 bioreactors for trace organic contaminant removal in wastewater treatment. *Environmental Technology &*
546 *Innovation* Volume 17, February 2020, 100564.
547
- 548 Liu, W.; Song, X.; Na, Z.; Li, G.; Luo, W. 2022. Strategies to enhance micropollutant removal from
549 wastewater by membrane bioreactors: Recent advances and future perspectives. *Bioresource Technology*
550 Volume 344, Part B, January 2022, 126322.
551
- 552 Lu, X.; Ye, Y.; Wang, Y.; Xu, J.; Sun, J.; Ji, J.; Zhang, Y.; Sun, X. 2023. Rapid generation of high-quality
553 recombinant antibodies using an Expi293F expression system for a 17 β -estradiol immunoassay. *Journal of*
554 *Hazardous Materials* Volume 451, 5 June 2023, 131126.
555
- 556 Massachusetts. Reclaimed water permit program and standards. 2009. Wastewater - Reclaimed Water |
557 Mass.gov (accessed 20 April 2023).
558
- 559 Montana. Permitting and Operator Assistance. 2009. Water Permitting and Operator Assistance | Montana
560 DEQ (mt.gov) (accessed 20 April 2023).
561
- 562 Moura, P; Aranha, F; Handan, N; Martin, L; Salles, M; Carvajal, E; Jardim, R; Sotero-Martins, A. Reuse
563 water: a sustainable alternative for Brazil. Rio de Janeiro, 2020 (In Portuguese)
564
- 565 Nevada. Water controls. 2018. STATE OF NEVADA (nv.gov) (accessed 22 April 2023).
566
- 567 North Carolina. Reclaimed water. 2011. subchapter u rules.pdf (nc.gov) (accessed 22 April 2023).
568
- 569 New Mexico. Natural resources and wildlife administration and use of water – General Provisions –
570 Underground storage and recovery. 2001 www.srca.nm.gov (accessed 06 June 2023).
571
- 572 NRMMC-EPHC-NHMRC. Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental
573 risks: Phase 2. Canberra, Australia, 2008. National Water Quality Management Strategy Australian
574 Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Augmentation of
575 Drinking Water Supplies (accessed 06 June 2023).
576
- 577 Oklahoma. Indirect potable reuse for surface water augmentation. 2018. 628-Permanent-Rules-Draft.pdf
578 (ok.gov) (accessed 06 June 2023).
579
- 580 Olaniyan, L., Mkwetshana, N.; Okoh, A. 2016. Triclosan in water, implications for human and environmental
581 health. *SpringerPlus* 5, 1639. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3287-x>.
582
- 583 Oregon. Implementing Oregon's Recycled Water Rules. 2009. Recycled Water IMD (oregon.gov) (accessed
584 06 June 2023).
585

- 586 Ouyang, D.; Chen, Y.; Chen, R.; Zhang, W.; Yan, J.; Gu, M.; Li, J.; Zhang, H.; Chen, M. 2022. Degradation
587 of 1,4-dioxane by biochar activating peroxymonosulfate under continuous flow conditions. *Science of The*
588 *Total Environment* Volume 809, 25 February 2022, 151929.
589
- 590 Passos, C.; Coelho, F.; Martins, M.; Amorim, S.; Santos, G.; Bessa, R. 2017. Assessing the presence and risk
591 of micropollutants in reclaimed water for potable reuse in Portugal, *Science of The Total Environment*,
592 Volume 598, 2017, Pages 1015-1024, ISSN 0048-9697.
593
- 594 Pennsylvania. Pennsylvania Department of Environmental Protection. 2012. Reuse of treated wastewater
595 guidance manual 385-2188-002 (accessed 06 June 2023).
596
- 597 Pico, R.; Mesa, J.; Vázquez-Suñé, E.; Carrera, J. 2018. Risks associated with direct potable water reuse:
598 State of the art and research needs. *Science of the Total Environment*, 619-620, 966-977.
599
- 600 Remy, C.; Roig, B.; Aboulfadl, K. 2019. Potable water reuse: A review of the main issues and challenges.
601 *Sustainability*, 11(13), 3516.
602
- 603 Rigueto, C.; Alessandretti, I.; Dettmer, A. Remoção de contaminantes emergentes de águas residuais por
604 adsorção: um review. In: *Anais do I Web Encontro Nacional de Engenharia Química*. Anais. Diamantina
605 (MG) online, 2021.
606
- 607 Robertson, W.; Stempvoort, D.; Spoelstra, J.; Brown, S.; Schiff, S. 2016. Degradation of sucralose in
608 groundwater and implications for age dating contaminated groundwater. *Water Research* Volume 88, 1
609 January 2016, Pages 653-660.
- 610 Sanchez-Flores, R.; Conner, A.; Kaiser, R. A. 2016 The regulatory framework of reclaimed wastewater for
611 potable reuse in the United States. *International Journal of Water Resources Development* 32 (4), 536–558.
612 doi 10.1080/07900627.2015.112931.
613
- 614 Santos, A.; Pachawo, V.; Melo, M.; Vieira, J. 2022. Progress on legal and practical aspects on water reuse
615 with emphasis on drinking water – an overview. *Water Supply*. doi 10.2166/ws.2021.412.
616
- 617 Song, S.; Kang, S.; Park, S. 2022. Association of Estrogen-Related Polygenetic Risk Scores with Breast
618 Cancer and Interactions with Alcohol Intake, Early Menarche, and Nulligravida. *Asian Pac J Cancer Prev*.
619 2022 Jan; 23(1): 13–24. doi 10.31557/APJCP.2022.23.1.13.
620
- 621 Sorn, S.; Hara-Yamamura, H.; Vet, S.; Xiao, M.; Hoek, E.; Honda, R. 2023. Biological treatment of
622 perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) using microbial capsules of a polysulfone membrane. *Chemosphere*
623 Volume 329, July 2023, 138585.
624
- 625 Tadkaew, N.; Hai, F.; McDonald, J.; Khan, S.; Nghiem, L. 2011. Removal of trace organics by MBR
626 treatment: The role of molecular properties. *Water Research* Volume 45, Issue 8, April 2011, Pages 2439-
627 2451.
628

- 629 Texas. Direct Potable Reuse Resource Document. 2015. Direct Potable Reuse Resource Document, Volume
630 1 of 2 (accessed 06 June 2023).
631
- 632 U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Potable Reuse Compendium. 2017.
633 epa.gov/sites/default/files/2018-01/documents/potablereusecompendium_3.pdf (accessed 06 June 2023).
634
- 635 U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Framework for Drinking Water Treatment Process
636 Optimization. 2014. Optimization Program for Drinking Water Systems | US EPA (accessed 06 June 2023).
637
- 638 U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidelines for Deriving Numerical National Water
639 Quality Criteria for the Protection Of Aquatic Organisms and Their Uses. 2010. Guidelines for Deriving
640 Numerical National Water Quality Criteria for the Protection of Aquatic Organisms and Their Uses
641 (epa.gov) (accessed 06 June 2023).
642
- 643 U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Guidelines for Water Reuse. 2012. 2012 Guidelines
644 for Water Reuse (epa.gov) (accessed 06 June 2023).
645
- 646 VIRGINIA. Water Reclamation and Reuse Regulation. 2008. 9VAC25-740-90. Minimum standard
647 requirements for reuses of reclaimed water. (virginia.gov) (accessed 06 June 2023).
648
- 649 Wang, X., Sun, D.; Yao, T. 2016. Climate change and global cycling of persistent organic pollutants: A
650 critical review. Sci. China Earth Sci. 59, 1899–1911. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5073-0>.
651
- 652 Warner, W.; Licha, T.; Nödler, K. 2019. Qualitative and quantitative use of micropollutants as source and
653 process indicators. A review. Science of the Total Environment 686. 2019. 75-89.
654
- 655 WASHINGTON. Reclaimed water use. 2022. Chapter 173-219 WAC: (accessed 05 June 2023).
656
- 657 WATEREUSE ASSOCIATION. Framework for Direct Potable Reuse. 2015. Framework for Direct Potable
658 Reuse | WaterReuse Association (accessed 05 June 2023).
659
- 660 Wen, L.; Lin, L.; Ta-Chen, S.; Pau-Chung, C.; Chien-Yu, L. 2013. Association Between Serum
661 Perfluorinated Chemicals and Thyroid Function in U.S. Adults: The National Health and Nutrition
662 Examination Survey 2007–2010. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, Volume 98, Issue
663 9, 1 September 2013, Pages E1456–E1464, <https://doi.org/10.1210/jc.2013-1282>.
664
- 665 WHO. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater—Vol II—Wastewater Use in
666 Agriculture, 3rd ed.; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2006; Volume 2, ISBN 92-4-
667 154683-2.
668
- 669 WORLD HEALTH ORGANIZATION. Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water. 2017.
670 Potable reuse (who.int) (accessed 22 April 2023).
671
- 672 Yoo, S.; Lee, S.; Kim, S. 2023. Acetaminophen adsorption to spherical carbons hydrothermally synthesized
673 from sucrose: experimental, molecular, and mathematical modeling studies. Environ Sci Pollut Res 30,
674 49703–49719 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25815>.

675

676 Zango, Z.; Khoo, K.; Garba, A.; Kadir, H.; Usman, F.; Zango, M.; Oh, W.; Lim, J. 2023. A review on
 677 superior advanced oxidation and photocatalytic degradation techniques for perfluorooctanoic acid (PFOA)
 678 elimination from wastewater. *Environmental Research* Volume 221, 15 March 2023, 115326.

679

680 Zhang, S.; Jiang, X. 2023. Association between perfluoroalkyl substances exposure and the prevalence of
 681 nonalcoholic fatty liver disease in the different sexes: a study from the National Health and Nutrition
 682 Examination Survey 2005–2018. *Environ Sci Pollut Res* 30, 44292–44303 (2023).
 683 <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25258-4>.

684 **6. STATEMENTS & DECLARATIONS**

685 *6.1 Ethical Responsibilities of Authors*

686 The manuscript was not submitted to more than one journal for simultaneous consideration.

687 The submitted work is original and not have been published elsewhere in any form or language.

688 *6.2 Consent to Participate*

689 The authors declare that they have agreed to participate in the creation of the present work.

690

691 *6.3 Consent to Publish*

692 The authors declare their acceptance of the publication of the present work in the journal *Environmental*
 693 *Science and Pollution Research*.

694 *6.4 Authors Contributions*

695 All authors contributed to the study conception and design. Material preparation and data collection were
 696 performed by Mickaela Midon da Paixão. Analysis were performed by all the authors, Ana Silvia Pereira
 697 Santos, Mickaela Midon da Paixão and Renata de Oliveira Pereira. The first draft of the manuscript was
 698 written by Mickaela Midon da Paixão and all authors commented on previous versions of the manuscript.
 699 All authors read and approved the final manuscript.

700 *6.5 Funding*

701 The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this
 702 manuscript.

703 The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

704 *6.6 Competing Interests*

705 The authors are interested in disseminating the achievements and advances related to the potable water
 706 reuse, its practice, and regulation worldwide, as well as the progress in regulating emerging pollutants in
 707 potable water reuse. This could enable the development of new legislation inspired by existing ones,
 708 bringing water security to various regions.

709

710

Constituent	WHO	Califórnia	Australia	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
	Limit (µg/L)						
(Propylenedinitrilo)tetraacetic acid (PDTA)			0.7				
1,1,1-Trichloroethane						200	
1,1,2-Trichloroethane						5	
1,1-Dichloroethylene						7	
1,2,4-Trichlorobenzene						70	
1,2-Dibromo-3-chloropropane	1					0.2	
1,2-Dibromoethane	0.4						
1,2-Dichlorobenzene	1000						
1,2-Dichloroethane	30					5	
1,2-Dichloroethene	50						
1,2-Dichloropropane	40					5	
1,3-Dichloropropene	20						
1,4-Dichlorobenzene	300						
1,4-Dioxane	50	0.1		0.032	0.1		1
1,7-Dimethylxanthine (Paraxanthine)			0.7				
17α-estradiol			0.175				
17α-ethinyl estradiol			0.0015				
17-β-estradiol			0.175	0.001	detection limit		detection limit
2,4,5-T	9						
2,4,5-TP (Silvex)	9					50	
2,4,6-Trichlorophenol	200						
2,4,6-Trinitro-1,3-dimethyl-5- tert-butylbenzene (musk xylene)			350				
2,4-D	30					70	
2,4-DB	90						
2,5-Dihydroxybenzoic acid			7				
2,6-dichlorophenol			10				
2,6-di-tert-butyl-1,4-benzoquinone (2,6- bis(1,1-dimethylethyl)-2,5- Cyclohexadiene-1,4-dione)			0.14				
2,6-di-tert-butylphenol (2,6-bis(1,1- dimethylethyl)phenol)			2				
4-Acetyl-6-t-butyl-1,1-dimethylindan			7				
4-Chloropheno			10				
4-cumylphenol			0.35				
4-methylphenol (p-Cresol)			600				
4-Nitrophenol			30				
4-tert-octylphenol			50				
6-Acetyl-1,1,2,4,4,7-hexamethyltetraline			4				
Acetophenone			400				
Acrylamide	0.5						
Alachlor	20					2	
Aldicarb	10						
Aldrin and Dieldrin	0.03						
Alprazolam			0.25				
Amoxycillin			1.5				
Androsterone			14				

Constituent	WHO	Califórnia	Australia	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
	Limit (µg/L)						
Anhydro-erythromycin A			17.5				
Anthracene			150				
Antipyrine			1000				
Aspirin			29				
Atenolol				0.063	4		4
Atorvastatin			5				
Atrazine	100					3	
Atrazine and its chloro-s-triazine metabolites	100						
Azithromycin			3.9				
Benzene	10					5	
Benzo(a)pyrene (PAHs)	0.7					0.2	
Benzyl chloride			0.2				
Betaxolol			10				
Bezafibrate (benzafibrate)			300				
Bisoprolol			0.63				
Bisphenol A		0.0005	200				
Bromate				0.1			
Bromoacetic acid			0.35				
Bromochloroacetonitrile			0.7				
Bromochloromethane			40				
Butylated hydroxyanisole			1750				
Butylated hydroxytoluene			1000				
Caffeine			0.35	0.35			
Carazolol			0.35				
Carbamazepine			100		10		10
Carbofuran	7					40	
Carbon Tetrachloride	4					5	
Cefaclor			250				
Cephalexin			35				
Chloramphenicol			175				
Chlordane	0,2						
Chlorobenzene						100	
Chlorophene			0.35				
Chlorotetracycline			105				
Chlorotoluron	30						
Chlorpyrifos	30						
Cholesterol			7				
Cimetidine			200				
Ciprofloxacin			250				
cis-1,2-Dichloroethylene						70	
Clarithromycin			250				
Clenbuterol			15				
Clindamycin			300				
Clofibric acid (clofibrate)			750				

Constituent	WHO	Califórnia	Australia	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
	Limit (µg/L)						
Codeine			50				
Coprostanol (5beta-Cholestan-3beta-ol)			0.7				
Cotinine			10		1		1
Cyanazine	0,6						
Cyclophosphamide			3.5				
Cylindrospermopsins	0.7						
Dalapon						200	
DDT and metabolites	1						
DEET - N,N- diethyl-meta-toluamide				0.447			
Dehydronifedipine			20				
Demeclocycline			300				
Demeton-S			0.15				
Di(2-ethylhexyl)adipate						400	
Di(2-ethylhexyl)phthalate	8					6	
Diatrizoate sodium			0.35				
Diatrizoic acid			0.35				
Diazepam			2.5				
Dibromoacetonitrile	70						
Dibromochloromethane	100						
Dibutyltin (DBT)			2				
Dichloroacetate	50						
Dichloroacetonitrile	20						
dichloroisocyanurate	40000						
Dichloromethane	20					5	
Dichlorprop	100						
Diclofenac			1.8				
Diltiazem			60				
Dimethoate	6						
Di-n-butyl phthalate			35				
Dinoseb						7	
Dioxin		0.0005	0.14				
Dipyron			525				
Diquat						20	
Doxycycline			10.5				
Edetic acid	600						
Enalaprilat			1.25				
Endothall						100	
Endrin	0.6						
Enrofloxacin			22				
Epichlorohydrin	0.4						
Equilenin			0.03				
Equilin			0.03				
Erythromycin			17.5				
Estradiol		0.0005	0.175				

Constituent	WHO	Califórnia	Australia	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
	Limit (µg/L)						
Estríol			0.05				
Estrone			0.03		0.32		0.32
Ethinyl estradiol					detection limit		detection limit
Ethylbenzene	300					700	
Ethylene Dibromide						0.05	
Fenoprofen			450				
Fenoprop	9						
Fluoxetine			10				
Fyrol FR 2 (tri(dichlorisopropyl) phosphate)			1				
Galaxolide			1750				
Gemfibrozil		0.01	600	0.894	0.01		
Gemfibrozil		0.01					
Glyphosate						700	
HAA5 - Haloacetic acids				0.245			
Heptachlor Epoxide						0.2	
Hexachlorobutadiene	0.6						
Hexachlorocyclopentadiene						50	
Hydroxyatrazine	200						
Ibuprofen			400				
Indomethacin			25				
Iohexol		0.05	720		0.05		
Iopamidol			400				
Iopromide			750	0.866			
Isophosphamide			3.5				
Isoproturon	9						
Ketoprofen			3.5				
Lincomycin			3500				
Lindane	2						
Mecoprop	10						
Meprobamate				0.447	200		200
Mestranol			0.0025				
Metformin			250				
Methoxychlor	20						
Metolachlor	10						
Metoprolol			25				
Microcystins	1						
Molinate	6						
Monensin			35				
Monobutyltin			0.7				
Monochloroacetate	20						
Musk ketone			350				
Musk tibetene			0.35				
N,N-diethyl-metatoluamide				0.447	200		200
N,N-diethyltoluamide (N,N-diethyl-3-methylbenzamide) (DEET)			2500				

Constituent	WHO	Califórnia	Australia	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
	Limit (µg/L)						
Nadolol			20				
Naladixic acid			1000				
Naphthalene			70				
Naproxen			220				
NDMA - N- nitrosodimethylamine				0.003			
Nitrilotriacetic acid	200						
N-Nitrosodimethylamine (NDMA)	0.1	0.002			0.002		
N-nitrosomorpholine			0.001				
N-Nitrosomorpholine (NMOR)		0.002	0.001		0.002		
Nonylphenol		0.0005	500				
Norethindrone			0.25				
Norfloxacin			400				
o-Dichlorobenzene						600	
Oxamyl (Vydate)						200	
Paracetamol (acetaminophen)			175				
p-Dichlorobenzene						75	
Pendimethalin	20						
Penicillin G			1.5				
Penicillin V			1.5				
Pentachlorophenol	9					1	
Pentamethyl-4,6-dinitroindane (musk moskene)			0.35				
Perchlorate				0.122	6		6
Perfluorooctane sulfonate (PFOS)		0.0065		0.014	0.2		0.2
Perfluorooctanoic acid (PFOA)		0.007		0.02	0.4		0.4
Pesticides		0.0005					
Phenanthrene			150				
Phenol			150				
Phenyltoin					2		2
Phthalic anhydride			7000				
Picloram						500	
Polybrominated		0.0005					
Polychlorinated biphenyls		0.0005					
Polychlorinated dibenzofurans		0.0005					
Polychlorinated dibenzo-p-dioxins		0.0005					
Polycyclic aromatic hydrocarbons		0.0005					
Primidone				0.1	10		10
Progesterone			105				
Propranolol			40				
Pyrene			150				
Roxithromycin			150				
Salbutamol			3				
Salicylic acid			105				
Saxitoxins	3						
Simazine	2					4	

Constituent	WHO	Califórnia	Australia	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
	Limit (µg/L)						
Stigmastanol			1000				
Styrene	20					100	
Sucralose		0.1		12.247	0.1		0.000015
Sulfadimethoxine			35				
Sulfamethazine			35				
Sulfamethiazole			35				
Sulfamethoxazole		0.01	35		0.01		
Sulfasalazine			500				
TCEP - Tris (2-chloroethyl) phosphate			1	0.071			
Temazepam			5				
Terbutaline			4.5				
Terbuthylazine	7						
Terramycin (oxytetracycline)			105				
Testosterone			7				
Tetrachloroethene	100						
Tetrachloroethylene						5	
Tetracycline			105				
THMs - Trihalomethanes				0.283			
Timolol			10				
Tolfenamic acid			17.5				
Toluene	700					1000	
Toxaphene						3	
trans-1,2-Dichloroethylene						100	
Tri(butyl cellosolve) phosphate (ethanol,2-butoxy-phosphate)			50				
Trichloroacetate	200						
Trichloroethene	8						
Trichloroethylene						5	
Triclosan			0.35	1.449	2100		2100
Trifluralin	20						
Trimethoprim			70				

Constituent	WHO	Califórnia	Australia	Texas	Flórida	Oklahoma	Water Reuse
	Limit (µg/L)						
Triphenyl phosphate			1				
Tris (2-Carboxyethyl) phosphine) hydrochloride					5		5
Tris(2-chloroethyl)phosphate			1				
Tylosin			1050				
Vinyl chloride	0.3					2	
Xylenes	500					10000	
Xylenes (Total)						10000	

Performance	
-------------	--

REFERENCES

California. Water quality control policy for recycled water. 2018. Water Quality Control Policy for Recycled Water (ca.gov) (accessed 22 April 2023).

Florida. Framework for the Implementation of Potable Reuse in Florida. 2020. Potable Reuse Chapter 62-610 F.A.C. and Framework for the Implementation of Potable Reuse in Florida Crosswalk (floridadep.gov) (accessed 22 April 2023).

NRMMC-EPHC-NHMRC. Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks: Phase 2. Canberra, Australia, 2008. National Water Quality Management Strategy Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 2) Augmentation of Drinking Water Supplies (accessed 06 June 2023).

Oklahoma. Indirect potable reuse for surface water augmentation. 2018. 628-Permanent-Rules-Draft.pdf (ok.gov) (accessed 06 June 2023).

Texas. Direct Potable Reuse Resource Document. 2015. Direct Potable Reuse Resource Document, Volume 1 of 2 (accessed 06 June 2023).

WATEREUSE ASSOCIATION. Framework for Direct Potable Reuse. 2015. Framework for Direct Potable Reuse | WateReuse Association (accessed 05 June 2023).

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water. 2017. Potable reuse (who.int) (accessed 22 April 2023).

Levantamento qualitativo sobre ocorrência de micropoluentes em matrizes aquosas brasileiras

Mickaela Midon da Paixão^{*^}, Renata de Oliveira Pereira^{**}, Ana Silvia Pereira Santos^{***}

* E-mail: mickaelapaixao@hotmail.com [^]Corresponding author

^{**}Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, 36036-900, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil. (E-mail: renata.pereira@ufjf.br) <https://orcid.org/0000-0002-3414-7292> (Orcid)

^{***} Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, 20550-900, Brasil. (E-mail: ana.pereira@eng.uerj.br)

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de uma revisão sistemática da literatura que teve como objetivo identificar e relacionar os micropoluentes mais estudados nas matrizes aquáticas brasileiras a partir de 2018. O estudo dos micropoluentes é crucial devido aos seus impactos adversos na saúde humana e ecossistemas aquáticos, destacando a necessidade de regulamentação e práticas sustentáveis para mitigar esses efeitos. A pesquisa abrangeu tanto trabalhos acadêmicos de mestrado e doutorado quanto artigos científicos. Além disso, foram analisadas as pesquisas que abordaram micropoluentes em águas superficiais, esgoto sanitário ou ambos. A distribuição geográfica das pesquisas encontradas por estados brasileiros também foi examinada. Os resultados indicam que o 17 α -etinilestradiol, diclofenaco, cafeína, 17- β -estradiol, ibuprofeno são os poluentes mais estudados no Brasil entre 2018 e novembro de 2023, destacando-as como as substâncias químicas de maior interesse em estudos ambientais e de saúde pública. A análise da distribuição geográfica demonstrou que as regiões sudeste e sul do país são mais proeminentes na pesquisa de micropoluentes, possivelmente devido a fatores como infraestrutura de pesquisa e disponibilidade de recursos. **Palavras-chave:** Águas Superficiais; Brasil; Distribuição geográfica; Crescimento da pesquisa; Esgoto

Abstract

This article presents the results of a systematic literature review aimed at identifying and correlating the most studied micropollutants in Brazilian aquatic matrices since 2018. The research encompassed both master's and doctoral academic works as well as scientific articles. Additionally, studies addressing micropollutants in surface waters, sanitary sewage, or both were analyzed. The geographical distribution of the identified research by Brazilian states was also examined. The findings indicate that 17 α -ethinylestradiol, diclofenac, caffeine, 17- β -estradiol, and ibuprofen are the most studied pollutants in Brazil between 2018 and November 2023, highlighting them as chemicals of significant interest in environmental and public health studies. The analysis of geographical distribution showed that the southeast and south regions of the country are more prominent in micropollutant research, possibly due to factors such as research infrastructure and resource availability. **Keywords:** Surface Waters; Brazil; Geographical Distribution; Research Growth; Sewage.

1 INTRODUÇÃO

Os micropoluentes são substâncias químicas que ocorrem em baixa concentração cujo impacto no meio ambiente e na saúde humana tem ganhado crescente atenção nos últimos anos (HEIDARI et al., 2022). Estes compostos, que incluem desde resíduos farmacêuticos e produtos de cuidados pessoais até produtos químicos industriais, podem ser encontrados em nossos sistemas aquáticos e têm o potencial de afetar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Essa crescente preocupação com os micropoluentes reflete-se na expansão das pesquisas sobre o tema em âmbito global (AJALA et al., 2022; PETEFFI et al., 2019; LIU et al., 2020).

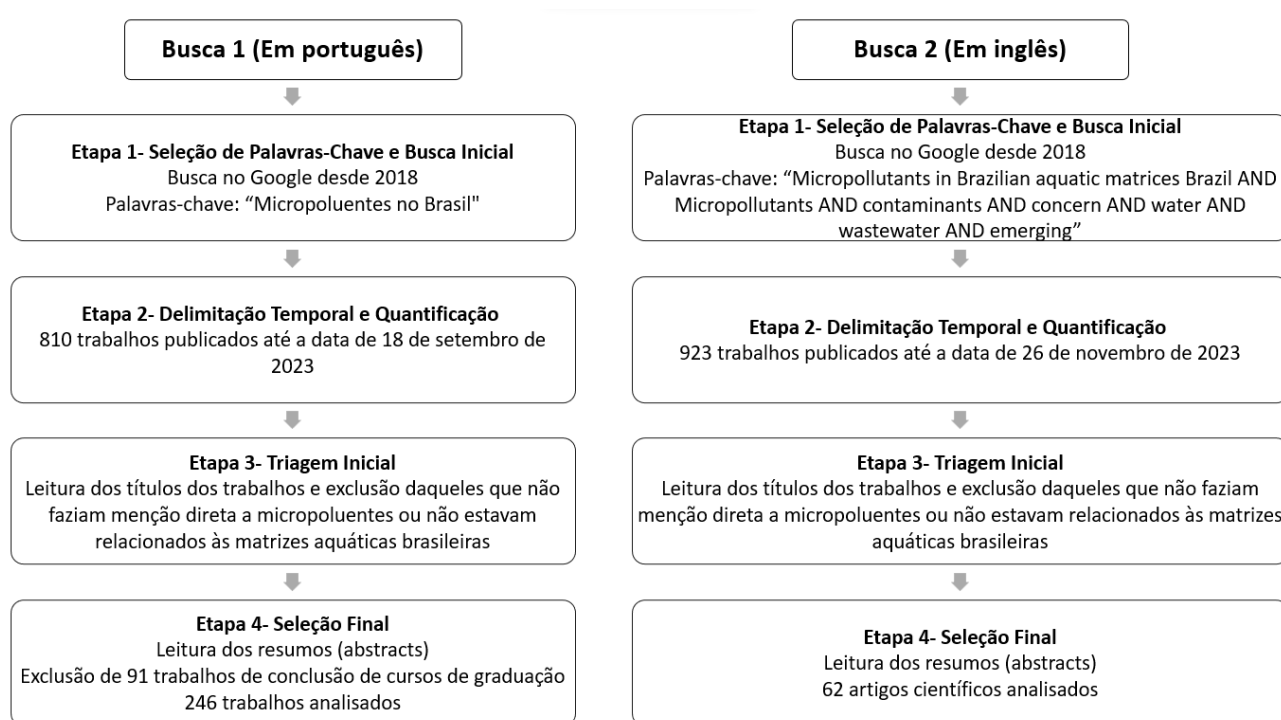
No contexto brasileiro, onde a disponibilidade de recursos hídricos é fundamental para diversos setores, como agricultura, indústria e abastecimento público, a compreensão e o estudo dos micropoluentes tornam-se ainda mais cruciais (MARSON et al., 2022). O Brasil, um país vasto e diverso em termos geográficos e ambientais, abriga uma variedade de ecossistemas aquáticos que são fundamentais para sua rica biodiversidade e para a sustentabilidade de muitas atividades econômicas. Portanto, a identificação e o monitoramento desses micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras têm implicações diretas na gestão dos recursos hídricos, na saúde pública e na preservação do ambiente (Bellón et al., 2020).

Este artigo se propõe a identificar quais são os micropoluentes mais estudados qualitativamente no Brasil e identificar lacunas e tendências no país. Abordando a relevância do estudo dos micropoluentes nos esgotos e águas superficiais brasileiras, destacando sua influência na regionalização do país e a importância de apoiar pesquisas que ampliem o conhecimento sobre esse tema crítico. Ao compreender a importância dos micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras e seu impacto em diversas regiões do país, se torna possível direcionar os esforços para uma gestão mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos, contribuindo para a preservação ambiental e a melhoria da qualidade de vida da população.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração desta pesquisa envolveu duas buscas sistemáticas da literatura com o objetivo de identificar e analisar estudos relacionados aos micropoluentes em matrizes aquáticas brasileiras, com enfoque no período de 2018 a novembro de 2023. O processo metodológico foi dividido em etapas que incluíram a seleção de palavras-chave, a delimitação temporal da busca, a triagem dos trabalhos encontrados e a seleção final dos trabalhos alvo da pesquisa. Foi realizada uma busca em português (busca 1) e uma busca em inglês (busca 2) a fim de coletar os resultados de produções acadêmicas e publicações científicas nacionais e internacionais. A figura 1 mostra a metodologia aplicada no presente trabalho.

Figura 1. Fluxograma da metodologia aplicada



2.1 Seleção de Palavras-Chave e Busca Inicial

A primeira etapa consistiu na seleção de palavras-chave adequadas para a busca de estudos relevantes. Utilizou-se o Google Acadêmico como ferramenta de pesquisa e as seguintes palavras-chave: "micropoluentes no Brasil" para a busca 1 e "Micropollutants in Brazilian aquatic matrices Brazil AND Micropollutants AND contaminants AND concern AND water AND wastewater AND emerging" para a busca 2.

Ambas as buscas foram refinadas a cada ano, permitindo verificar o número de trabalhos publicados anualmente no período de 2018 a 2023. Essa etapa inicial da pesquisa visou a obtenção de um panorama geral sobre a produção acadêmica relacionada ao tema no Brasil.

2.2 Delimitação Temporal e Quantificação

Com a delimitação temporal estabelecida a partir de 2018, foram encontrados na busca 1 um total de 810 trabalhos publicados até a data de 18 de setembro de 2023. Já na busca 2 foram encontrados 923 trabalhos publicados até a data de 26 de novembro de 2023. Esta etapa da pesquisa permitiu identificar o volume de pesquisas recentes relacionadas aos micropoluentes em matrizes aquáticas brasileiras.

2.3 Triagem Inicial

Após a obtenção dos resultados da busca, iniciou-se à triagem inicial dos trabalhos encontrados. Nessa fase, realizou-se a leitura dos títulos dos trabalhos e excluiu-se aqueles que não faziam menção direta a micropoluentes ou não estavam relacionados às matrizes aquáticas brasileiras. Adicionalmente, os trabalhos de graduação foram descartados visto que não possuem peso científico para as análises do presente trabalho. Na busca 2, foi realizada uma verificação para que os trabalhos encontrados nesta etapa não estivessem presentes na primeira busca.

2.4 Seleção Final

A partir dos trabalhos que passaram pela triagem inicial, realizou-se a leitura dos resumos (abstracts) ou resumos estendidos, quando disponíveis. Durante essa etapa, excluiu-se os trabalhos que não abordavam o tema de micropoluentes em matrizes aquáticas brasileiras ou que não apresentavam relevância para a pesquisa.

A aplicação dessa metodologia resultou pela busca 1 na seleção de 337 trabalhos que se encaixavam nos critérios de pesquisa, porém 91 deles eram trabalhos de conclusão de cursos de graduação e não foram considerados como alvo para a análise detalhada. Os 246 trabalhos restantes que eram oriundos de dissertações de mestrado, teses de doutorado ou artigos científicos foram então submetidos a uma análise aprofundada para identificar o nome dos micropoluentes de forma qualitativa, o estado onde foi realizado o estudo e em qual matriz (água e esgoto) o poluente foi avaliado, identificando assim as tendências de pesquisa no contexto brasileiro.

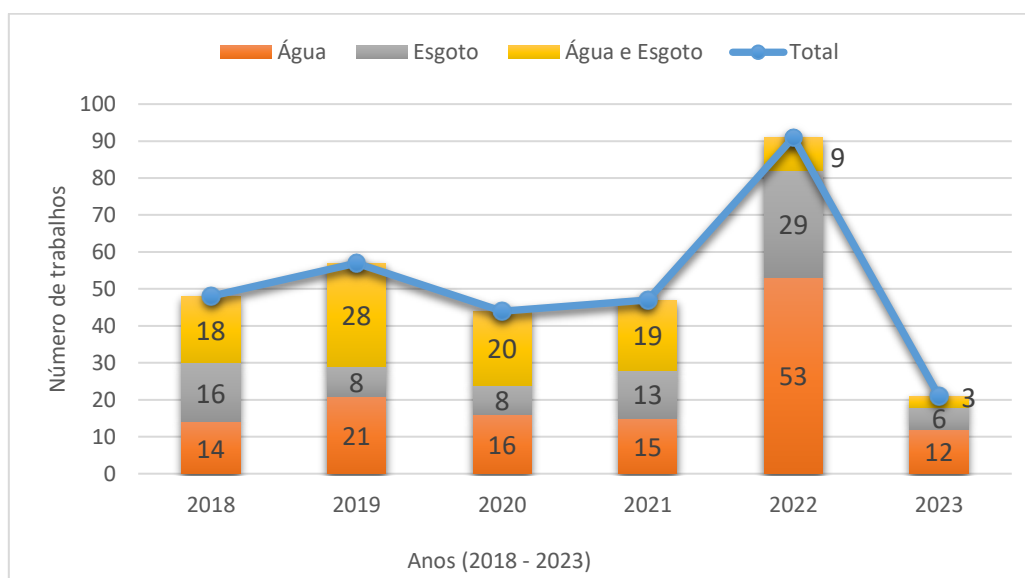
Seguindo os mesmos critérios, a busca 2 resultou na seleção de 62 artigos científicos considerados como alvo para a análise detalhada. Os trabalhos acadêmicos encontrados nesta etapa já haviam sido selecionados na busca 1, e por se tratar de uma busca em inglês esperava-se que os resultados fossem majoritariamente de artigos científicos publicados em revistas internacionais.

Após o levantamento de todos os trabalhos, realizou-se uma análise qualitativa para conhecimento dos micropoluentes mais estudados e sua divisão de acordo com suas classes, e com base nessa relação, buscou-se quais trabalhos traziam informações quantitativas sobre a presença e concentrações desses compostos nas matrizes aquáticas brasileiras. Como o resultado da busca qualitativa foi extenso, o trabalho focou nos micropoluentes mais estudados, colocando como linha de corte os micropoluentes abordados em 15 trabalhos ou mais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos últimos 5 anos, o Brasil testemunhou uma notável evolução no interesse e na pesquisa relacionada aos micropoluentes. Esses compostos químicos, muitas vezes presentes em concentrações mínimas, podem ter impactos significativos no meio ambiente e na saúde humana, a Figura 1 mostra a relação das pesquisas neste período.

Figura 1. Relação anual do número de pesquisas sobre micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras de 2018 a 2023



O gráfico da Figura 1 ilustra a evolução do número de pesquisas sobre micropoluentes ao longo dos anos. No período de 5 anos pode se observar um pico no número de pesquisas no ano de 2022. A partir da Figura 1 e tabela 1 é possível observar que a matriz água é predominante em quase todos os anos, somente em 2018 o número de pesquisas focadas em esgotos supera o número de água. Ou seja, no período estudado as pesquisas sobre micropoluentes é mais relacionada à presença dos compostos nos corpos hídricos brasileiros do que nos esgotos.

Tabela 1. Relação das pesquisas por matriz aquáticas nas buscas 1 e 2

Matriz	Busca 1	Busca 2	Total de Pesquisas (Busca 1 + Busca 2)
Água	105	26	131
Esgoto	55	25	80
Água e Esgoto	86	11	97
Total	246	62	308

Os dados apresentados indicam que 175 compostos específicos foram objeto de estudo único, ressaltando a concentração em áreas específicas de pesquisa. É notável que, dentro desse conjunto, 83,7% dos micropoluentes analisados possuam um número de trabalhos igual ou inferior a quatro como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Distribuição do número de compostos em relação ao número de trabalhos

Nº de compostos	Nº de Trabalhos	Frequência
350	1 - 4 trabalhos	83,7%
38	5 - 9 trabalhos	9,1%
16	10 - 20 trabalhos	3,8%
14	21 - 82 trabalhos	3,3%

Os resultados da Tabela 2 indicam que a maioria dos compostos está associada a 1 a 4 trabalhos. Em seguida, 9,1% dos compostos têm entre 5 e 9 trabalhos relacionados. Compostos com 10 a 20 trabalhos representam 3,8% da amostra, enquanto aqueles com 21 a 82 trabalhos correspondem a 3,3% do total. Esses dados sugerem que a maioria dos compostos possui uma quantidade limitada de trabalhos associados, com uma pequena porcentagem apresentando um número mais significativo de publicações. Em resumo, a distribuição revela que a maioria dos compostos tem uma presença limitada na pesquisa, enquanto alguns recebem atenção mais intensiva. Esses resultados podem fornecer insights sobre a diversidade de compostos estudados, a profundidade da pesquisa associada a cada um e possíveis áreas de foco ou lacunas na literatura científica relacionada a esses compostos.

3.1 Resultados da Busca Sistemática quanto ao tipo de trabalho

No total, foram identificados e selecionados 337 documentos para análise em português. A seguir, está a distribuição desses documentos de acordo com sua natureza. Os documentos selecionados na busca sistemática da literatura se dividiram em quatro categorias principais, conforme apresentado a seguir:

- Artigo Científico: 46
- Trabalho Acadêmico (Graduação): 91

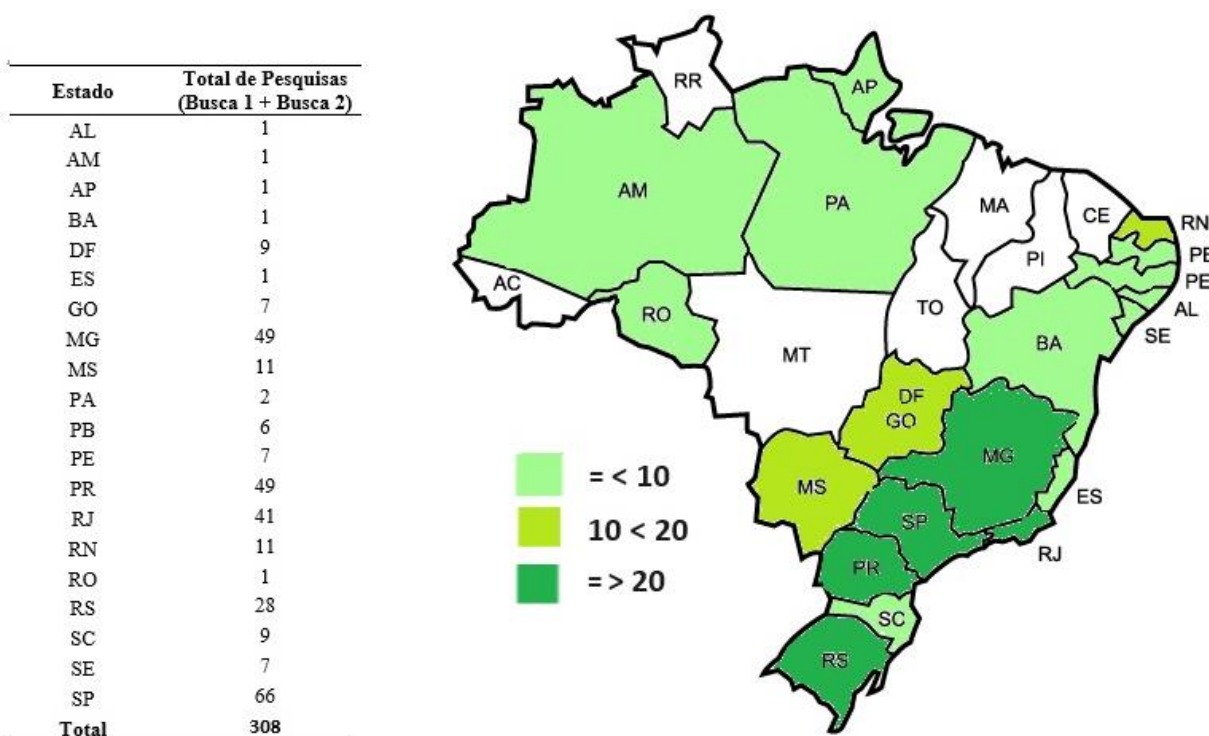
- Trabalho Acadêmico (Mestrado): 134
- Trabalho Acadêmico (Doutorado): 66

É importante observar que a maior parte dos documentos encontrados corresponde a trabalhos acadêmicos de nível de mestrado e graduação. Isso sugere que existe um interesse na pesquisa acadêmica em relação ao tema de estudo. Para a análise dos micropoluentes mais estudados não foram utilizados os trabalhos de graduação, visto que não possuem peso científico, sendo assim foram selecionados 246 trabalhos. Como mencionado anteriormente, como resultado da busca 2, foram selecionados 62 artigos científicos.

3.3 Distribuição Geográfica das Pesquisas

A distribuição dessas pesquisas por estados brasileiros é apresentada na figura 2.

Figura 2. Distribuição por estado das pesquisas nas buscas 1 e 2



A análise da distribuição geográfica das pesquisas revela algumas tendências interessantes. Os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio de Janeiro se destacam com o maior número de trabalhos publicados respectivamente, indicando uma maior concentração de pesquisa nessas regiões. Essa concentração pode ser atribuída à presença de universidades de renome, centros de pesquisa e recursos acadêmicos nessas áreas.

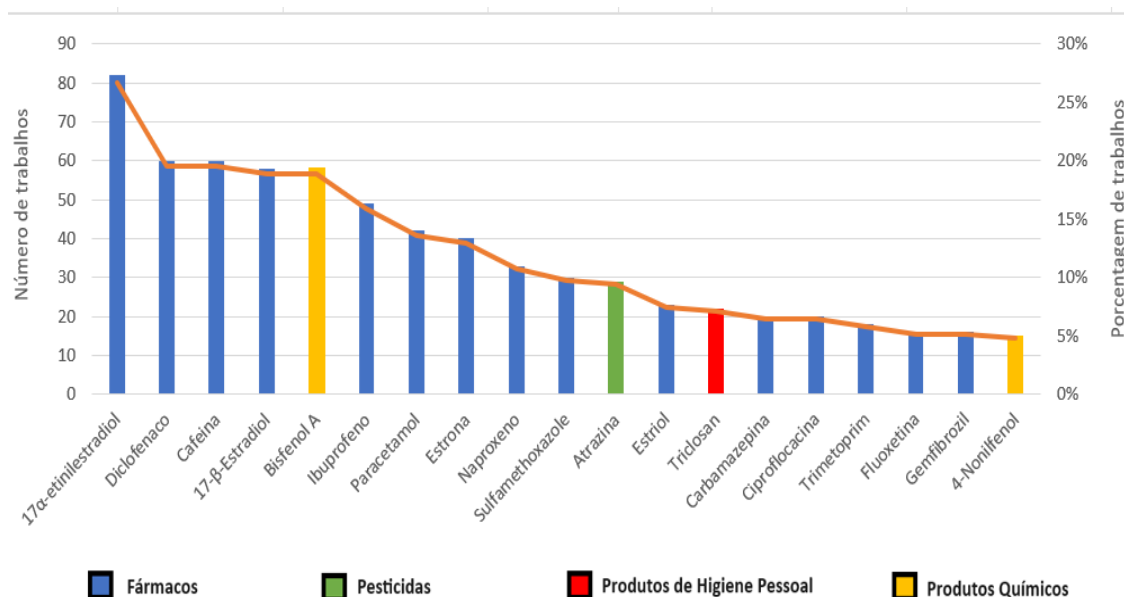
A distribuição geográfica das pesquisas encontradas indica que a produção de conhecimento sobre o tema não está uniformemente distribuída pelo país. Isso tem implicações importantes para a pesquisa futura, uma vez que pode ser relevante considerar as especificidades regionais ao planejar estudos ou intervenções relacionadas a regulamentação dos poluentes emergentes no Brasil. Além disso, pode ser benéfico promover a colaboração entre instituições de diferentes estados para compartilhar experiências e recursos.

3.4 Micropoluentes estudados

Após uma análise dos resultados provenientes das pesquisas sobre a presença de micropoluentes nas matrizes aquáticas brasileiras, foi possível identificar os compostos mais estudados desde 2018. Ao explorar os dados compilados, foi possível identificar padrões, tendências e áreas de preocupação específicas relacionadas a compostos de grande utilização pela população brasileira.

Nos últimos cinco anos, um total de 418 compostos foram estudados no Brasil, e a Figura 3 apresenta os resultados dessas substâncias mais estudadas em ambas as matrizes aquáticas nesse período separados por classe.

Figura 3. Compostos mais estudados nos últimos 5 anos no Brasil por classe



Na Figura 3 observa-se que a maior parte dos compostos listados são fármacos, com um total de 10 compostos, incluindo o 17 α -etinilestradiol, diclofenaco, cafeína, 17- β -estradiol, ibuprofeno, paracetamol, estrona, naproxeno, carbamazepina e fluoxetina. Esses compostos farmacêuticos têm sido alvo de crescente atenção devido à sua presença frequente em águas superficiais e potencial impacto ambiental (KHAN et al., 2020). A classe de fármacos abrange uma variedade de substâncias que incluem analgésicos, anti-inflamatórios, hormônios, antidepressivos e outros medicamentos.

A presença proeminente de compostos farmacêuticos destaca a necessidade urgente de compreender os efeitos ambientais dessas substâncias. A classe de fármacos é particularmente relevante devido à sua capacidade de afetar organismos aquáticos e ecossistemas, mesmo em concentrações muito baixas. A exposição contínua a esses micropoluentes pode ter implicações para a vida selvagem e para a saúde humana, tornando crucial a implementação de medidas de gestão e regulamentação para mitigar esses impactos (PORRETTI et al., 2022). O aumento na pesquisa desses compostos reflete o reconhecimento da importância de abordar os desafios associados à presença de fármacos no meio ambiente e destaca a necessidade de desenvolver estratégias sustentáveis para o gerenciamento desses poluentes emergentes. Tanto nos estados brasileiros quanto a nível federal não há regulamentação para fármacos e produtos de higiene pessoal, dos compostos apresentados na Figura 3, apenas atrazina é regulamentada pela CONAMA 357 e portaria 888/2021.

A busca revelou que os cinco compostos mais frequentemente abordados nas pesquisas relacionadas ao cenário brasileiro são 17 α -etinilestradiol, diclofenaco, cafeína, 17- β -estradiol e bisfenol A, com 82, 60, 60, 58 e 58 trabalhos, respectivamente. A análise conjunta das duas fontes de pesquisa contribui para uma compreensão mais completa do panorama de estudos sobre micropoluentes no Brasil, proporcionando *insights* valiosos para futuras pesquisas e ações mitigadoras.

A tabela 3 apresenta uma análise temporal dos micropoluentes mais abordados em amostras de água e esgoto ao longo dos anos de 2018 a 2023.

Tabela 3. Análise temporal dos micropoluentes mais estudados por matriz

Composto		17 α -etinilestradiol	Cafeína	Diclofenaco	17- β -Estradiol	Bisfenol A
2018	Água	8 pesquisas	5 pesquisas	7 pesquisas	5 pesquisas	12 pesquisas
	Esgoto	6 pesquisas	6 pesquisas	9 pesquisas	5 pesquisas	7 pesquisas
2019	Água	13 pesquisas	3 pesquisas	6 pesquisas	7 pesquisas	4 pesquisas
	Esgoto	17 pesquisas	3 pesquisas	4 pesquisas	6 pesquisas	4 pesquisas
2020	Água	9 pesquisas	5 pesquisas	3 pesquisas	7 pesquisas	10 pesquisas
	Esgoto	5 pesquisas	4 pesquisas	2 pesquisas	5 pesquisas	6 pesquisas
2021	Água	10 pesquisas	10 pesquisas	7 pesquisas	7 pesquisas	9 pesquisas
	Esgoto	12 pesquisas	7 pesquisas	7 pesquisas	6 pesquisas	2 pesquisas
2022	Água	12 pesquisas	16 pesquisas	9 pesquisas	8 pesquisas	6 pesquisas
	Esgoto	10 pesquisas	5 pesquisas	10 pesquisas	4 pesquisas	8 pesquisas
2023	Água	3 pesquisas	2 pesquisas	5 pesquisas	3 pesquisas	4 pesquisas
	Esgoto	1 pesquisas	4 pesquisas	1 pesquisas	1 pesquisas	2 pesquisas

Essa análise revela mudanças nas prioridades de pesquisa ao longo do tempo, destacando a dinâmica na atenção dada a diferentes micropoluentes em água e esgoto. Essas variações podem ser influenciadas por fatores como avanços tecnológicos, preocupações emergentes na saúde pública e mudanças nas práticas industriais, refletindo a necessidade contínua de monitoramento e pesquisa para abordar os desafios associados à presença de micropoluentes no ambiente. Vale ressaltar que alguns trabalhos abordavam a presença dos micropoluentes tanto na matriz água superficial quanto esgoto.

O mais pesquisado foi o 17 α -etinilestradiol, estudado em 25% das pesquisas. É um derivado sintético do hormônio estrogênio, é amplamente utilizado em contraceptivos orais devido à sua eficácia na prevenção da gravidez. Este composto, ao chegar às águas residuais, pode persistir no ambiente e, devido à sua natureza endócrina, suscita preocupações sobre os efeitos nos organismos aquáticos e, conseqüentemente, na saúde humana (MACHADO et al., 2011). Segundo Klaica e Jirsa (2022) a exposição crônica ao 17 α -etinilestradiol pode influenciar o sistema endócrino, levando a desequilíbrios hormonais que, por sua vez, podem impactar a reprodução e o desenvolvimento de organismos, incluindo seres humanos. Este composto causa efeitos adversos mesmo em baixas concentrações, e ainda não é regulamentado em grande parte do mundo (HERRMANN et al., 2023). Como se pode observar na Tabela 3, o 17 α -etinilestradiol é estudado tanto na matriz água, quanto na matriz esgoto, em teoria como sua liberação ocorre pelas fezes, em se ter uma coleta e tratamento eficiente de efluentes domésticos seria possível controlar suas concentrações em águas superficiais (Wan et al., 2022). Todavia, se deve controlar outras fontes como o descarte incorreto de fármacos e tratamento de efluentes hospitalares que muitas vezes também estão associados à presença desses compostos nos corpos hídricos.

Em segundo lugar está o diclofenaco (19 % dos trabalhos), um anti-inflamatório não esteroide, é utilizado para alívio da dor e inflamação em pacientes humanos e animais. No entanto, a presença generalizada deste fármaco nas águas residuais levanta sérias preocupações ambientais e de saúde (AMANULLAH et al., 2023). A exposição a longo prazo ao diclofenaco pode resultar em efeitos adversos nos organismos aquáticos, com implicações para a cadeia alimentar. Além disso, a ingestão indireta de água contaminada por diclofenaco pode causar problemas renais e gastrointestinais em seres humanos, enfatizando a necessidade de avaliar e mitigar seus impactos ao longo do tempo (AZEVEDO et al., 2023).

Em terceiro a cafeína (também com 19 % dos trabalhos) é uma substância estimulante encontrada em café, chá, bebidas energéticas e alguns medicamentos. Embora seja considerada segura em doses moderadas para os humanos, a sua presença disseminada no ambiente aquático representa

um desafio significativo. Segundo Clayman e Connaughton (2022) concentrações elevadas de cafeína podem afetar negativamente organismos aquáticos, como peixes e anfíbios, impactando seu comportamento e ciclo reprodutivo. Além disso, em humanos, a cafeína em excesso pode levar a distúrbios do sono, ansiedade e palpitações cardíacas, ressaltando a importância de regulamentações para controlar sua presença nas águas (REPANTIS et al., 2020). A cafeína, identificada como indicador de atividade antrópica, revela a presença de efluentes domésticos em corpos d'água urbanos. Essa detecção é crucial para avaliar a contaminação ambiental, orientando estratégias de gestão e tratamento de recursos hídricos e destacando a cafeína como biomarcador essencial para identificar impactos da ação humana nos ecossistemas aquáticos (BEGA et al., 2021).

Em quarto lugar o estradiol, que segundo Hajializadeh e Khaksari (2021) é um composto químico pertencente à classe dos estrogênios, que são hormônios sexuais predominantes nas fêmeas de mamíferos, incluindo os seres humanos. Este hormônio desempenha um papel crucial no desenvolvimento e funcionamento do sistema reprodutivo feminino, influenciando a regulação do ciclo menstrual, o crescimento dos tecidos mamários e a manutenção da saúde óssea. Apesar de sua importância biológica, o 17- β -estradiol também é considerado um micropoluente preocupante devido à sua presença em sistemas aquáticos, muitas vezes proveniente de fontes como resíduos de produtos farmacêuticos, contraceptivos orais e excreção humana. A presença do 17- β -estradiol em concentrações ambientais pode suscitar preocupações devido aos potenciais efeitos disruptivos endócrinos em organismos aquáticos e à possibilidade de impactos adversos na saúde ambiental. Em 2015, a União Europeia lançou uma lista de observação, “*Watch List*” para monitorizar, entre outros, o nonilfenol e o 17- β -estradiol no âmbito da Diretiva Quadro da Água (DQA) com vista a uma eventual regulamentação (RAPP-WRIGHT et al., 2023).

Em quinto lugar o bisfenol A (BPA) é uma substância química amplamente usada na produção de plásticos, revestimentos de embalagens e resinas. Sua presença generalizada no meio ambiente levanta preocupações significativas, uma vez que estudos indicam que o BPA pode agir como um desregulador endócrino, interferindo nas vias hormonais naturais do corpo (XIAO et al., 2020). A exposição a esse composto tem sido associada a distúrbios hormonais, problemas reprodutivos e até mesmo ao desenvolvimento de certas condições de saúde, como diabetes e obesidade. A ampla utilização do BPA na fabricação de produtos do cotidiano, como garrafas plásticas e embalagens alimentícias, intensifica a importância de políticas de controle para limitar sua presença e minimizar os riscos à saúde humana (CIMMINO et al., 2020).

A crescente compreensão dos impactos desses compostos ressalta a necessidade urgente de políticas rigorosas de controle e regulamentação para monitorar e mitigar os efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. Dos 5 micropoluentes mais pesquisados, 3 são desreguladores endócrinos. Surpreendentemente, apenas a atrazina é regulamentada, enquanto, de modo geral, os compostos monitorados carecem de regulamentação no Brasil. A preocupação recente com compostos como PFOS/PFOA é evidenciada por apenas 2 estudos cada, embora sejam investigados internacionalmente (LEUNG et al., 2022).

A importância de realizar uma busca quantitativa nas matrizes aquáticas é crucial para verificar se esses compostos estão presentes. Isso não apenas fortalece a base de evidências, mas também orienta medidas regulatórias para proteger ecossistemas aquáticos e a saúde humana, considerando a possível contaminação por substâncias prejudiciais. O controle do uso dessas substâncias, o desenvolvimento de alternativas mais seguras e a implementação de tecnologias avançadas de tratamento de água e de efluentes são essenciais para garantir a proteção a longo prazo da qualidade da água para consumo humano e a saúde da população.

Rezende (2022) conduziu uma revisão de 20 estudos que investigaram a presença de 41 poluentes de preocupação emergente nas águas superficiais brasileiras. Os resultados dessa análise revelaram que o Bisfenol-A foi o composto mais frequentemente detectado, seguido pela cafeína, diclofenaco, 17- β -estradiol, 17- α -etinilestradiol, naproxeno, triclosan e 4-n-nonilfenol. Essas descobertas alinham-se de maneira consistente com os resultados do presente trabalho,

destacando uma correspondência direta entre os compostos mais estudados e aqueles mais frequentemente identificados no cenário brasileiro. Essa congruência ressalta a relevância desses poluentes específicos nas preocupações ambientais do país, sublinhando a importância contínua da pesquisa e monitoramento desses compostos para uma gestão eficaz da qualidade da água.

De acordo com Gomes (2018) que realizou uma quantificação das concentrações de 17 α -etinilestradiol na região do Lago Paranoá em Brasília, o 17 α -etinilestradiol foi encontrado em todas as amostras de esgoto bruto (1,31 – 2,08 ng. L-1) e de efluente tratado (0,23 – 1,50 ng.L-1), e em uma das amostras de água superficial do Lago Paranoá (0,07 ng. L-1). Já no estado do Rio de Janeiro, o 17 α -etinilestradiol foi encontrado no sistema lagunar de Itaipu com a concentração de 53,9 ng. L-1 (CUNHA, 2018). Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 1,83 ng. L-1 como a menor concentração e 4390 ng. L-1 como a maior concentração quantificada.

O Diclofenaco foi quantificado em 40,8 ng. L-1 no rio lontra no estado do paraná (KOERICH et al., 2021). Já Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 5,35 ng. L-1 como a menor concentração e 785 ng. L-1 como a maior concentração quantificada.

A cafeína foi quantificada em 230,4 ng. L-1 no rio lontra no estado do paraná (KOERICH et al., 2021). A cafeína foi também encontrada nas amostras das águas provenientes do Córrego Rico, que está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu no estado de São Paulo, com concentração máxima de 406,2 ng.L-1 no período mais seco (CARVALHO et al., 2022). Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 0,3 ng. L-1 como a menor concentração e 41700 ng. L-1 como a maior concentração quantificada.

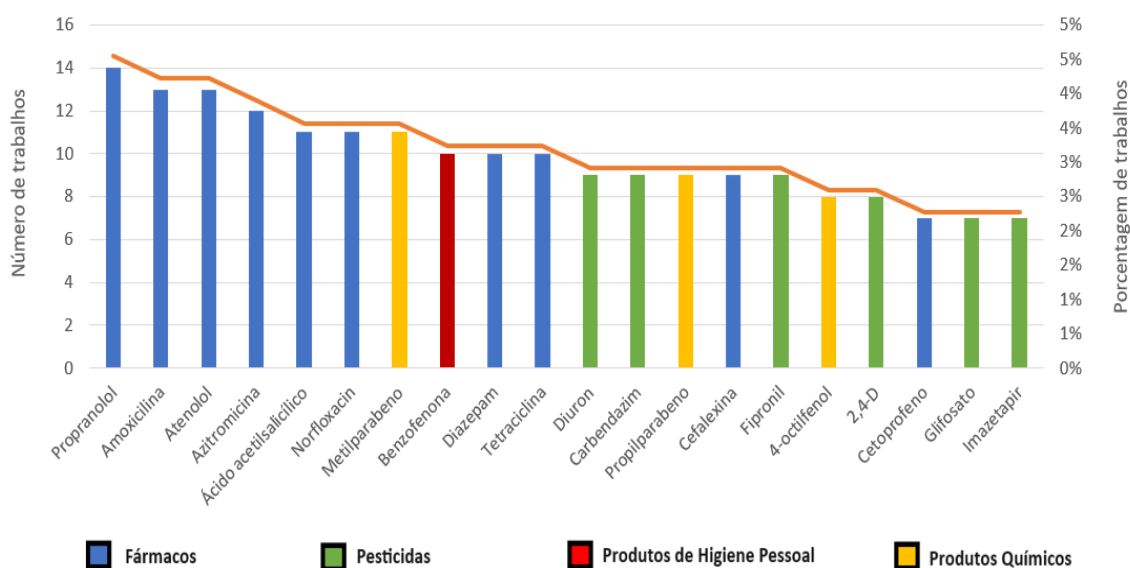
Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 2,89 ng. L-1 como a menor concentração e 6806 ng. L-1 como a maior concentração de 17- β -Estradiol quantificada na Bacia do Rio Atibaia em Campinas, estado de São Paulo. No estado do Rio de Janeiro, o 17- β -Estradiol foi encontrado no sistema lagunar de Itaipu com a concentração de 11,4 ng. L-1 e 23,8 ng. L-1 foi a concentração quantificada no sistema lagunar de Piratininga (CUNHA, 2018).

No estado do Rio de Janeiro, o bisfenol A foi encontrado no sistema lagunar de Itaipu com a concentração de 368,4 ng. L-1 e 251,9 ng. L-1 foi a concentração quantificada no sistema lagunar de Piratininga (CUNHA, 2018). Rezende (2022) em sua avaliação encontrou 0,3 ng. L-1 como a menor concentração e 41700 ng. L-1 como a maior concentração de bisfenol A.

A análise de concentrações em diferentes locais, como no Lago Paranoá em Brasília, no rio lontra no estado do Paraná e na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu em São Paulo, mostra as concentrações variadas encontradas e ressalta a complexidade das fontes e dos padrões de contaminação. Fornecendo assim informações sobre os desafios enfrentados na gestão da qualidade da água. As variações observadas destacam a importância de uma vigilância contínua e estratégias eficazes para mitigar os impactos desses poluentes emergentes no ambiente aquático brasileiro.

Em relação à regulamentação, é notável que muitos dos compostos encontrados neste estudo ainda não possuem uma regulamentação específica no Brasil, indicando uma lacuna regulatória que merece atenção. Esse é o caso especialmente para os compostos destacados na Figura 3, que representam os mais estudados na lista. Por outro lado, é interessante observar que os compostos destacados na Figura 4, que compõem o segundo grupo mais estudado, em sua maioria já têm uma regulamentação estabelecida. Isto sugere um alinhamento entre o aumento do escrutínio científico e a subsequente implementação de regulamentações para essas substâncias, indicando um movimento em direção ao controle e monitoramento mais efetivo desses compostos no país. Essa correlação ressalta a importância de pesquisas científicas na influência das políticas de regulamentação.

Figura 4. Compostos estudados por 7 a 14 trabalhos e suas classes



Os resultados da análise indicam uma diversidade de compostos químicos presentes na lista, classificados em quatro categorias principais: Fármacos, Pesticidas e Agrotóxicos, Químicos Industriais e Produtos de Higiene Pessoal. Os fármacos é a categoria mais extensa, refletindo um interesse substancial em substâncias farmacêuticas. Compostos como analgésicos, antibióticos, antivirais, anti-hipertensivos e outros medicamentos são prevalentes, indicando uma forte ênfase nas investigações relacionadas à saúde humana.

Pesticidas e Agrotóxicos são o segundo grupo mais presente nos resultados da pesquisa, o que sugere uma atenção considerável aos impactos ambientais e de saúde associados à agricultura. Esta categoria inclui herbicidas, fungicidas, inseticidas e outros produtos químicos agrícolas, refletindo preocupações sobre a segurança alimentar e os efeitos no ecossistema. Químicos Industriais são a terceira categoria mais encontrada, embora numericamente menor em comparação com as duas categorias anteriores, a presença de químicos industriais aponta para a investigação de substâncias utilizadas em processos industriais. Esses compostos podem ter diversas aplicações, desde produtos manufaturados até processos de fabricação.

Produtos de Higiene Pessoal é a categoria menos representada na lista, incluindo compostos encontrados em produtos de cuidado pessoal, como protetores solares, conservantes em cosméticos e antimicrobianos. Embora numericamente menor, reflete um interesse contínuo na segurança e eficácia desses produtos.

4 CONCLUSÃO

A busca sistemática da literatura resultou na identificação de um conjunto 308 documentos relacionados ao tema proposto. A distribuição dos documentos por categoria revelou uma predominância de trabalhos acadêmicos de nível mestrado nacionalmente. A análise da distribuição dos trabalhos por estados brasileiros mostrou que São Paulo foi o estado com o maior número de pesquisas, seguido por Paraná e Minas Gerais. Isso permite identificar regiões com maior concentração de estudos e possíveis disparidades regionais no conhecimento produzido.

A análise abrangente dos micropoluentes que resultou em 418 compostos estudados revela a extensão e a diversidade das substâncias químicas estudadas em ambientes aquáticos brasileiros. A predominância de compostos como 17α -etinilestradiol, Diclofenaco, Cafeína, 17β -Estradiol e Bisfenol A que constam em 58 ou mais das pesquisas analisadas, reflete a crescente preocupação

global sobre os potenciais impactos dessas substâncias na saúde humana e nos ecossistemas aquáticos. Recomenda-se um estudo quantitativo desses compostos para se avaliar se de fato a porcentagem de detecção e concentrações são preocupantes na realidade brasileira, complementando assim a análise qualitativa realizada no presente trabalho.

Os dados indicam que esses são os compostos mais estudados tanto em água como em esgoto. A necessidade urgente de políticas regulatórias e estratégias de gestão hídrica para limitar a presença dessas substâncias é evidente, já que o país ainda carece dessas regulamentações. Este trabalho fornece informações que podem auxiliar o processo de tomada de decisão para a implementação de medidas preventivas e soluções sustentáveis, destacando a importância de abordagens integradas para proteger os recursos hídricos brasileiros e promover a saúde a longo prazo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ajala, O., Tijani, J., Salau, R., Abdulkareem, A., Aremu, O. 2022. A review of emerging micro-pollutants in hospital wastewater: Environmental fate and remediation Options. Results in Engineering, Volume 16, December 2022, 10067.

Amanullah, A., Upadhyay, A., Dhiman, R., Singh, S., Kumar, A., Kumar, A., Ahirwar, D., Gutti, R., Mishra, A. 2022. Development and Challenges of Diclofenac-Based Novel Therapeutics: Targeting Cancer and Complex Diseases. Cancers 2022, 14(18), 4385; <https://doi.org/10.3390/cancers14184385>.

Azevedo, C., Machado, F., Souza, N., Silveira, L., Lima, E., Andreazza, R., Bergamnn, C. 2023. Comprehensive adsorption and spectroscopic studies on the interaction of carbon nanotubes with diclofenac anti-inflammatory. Chemical Engineering Journal. Volume 454, Part 2, 15 February 2023, 140102.

BEGA, J., Oliveira, J., Albertin, L., Isique, W. Uso da cafeína como indicador de poluição por esgoto doméstico em corpos d'água urbanos. *Eng Sanitária e Ambiental*, v. 26, n. 2, mar/abr 2021, p. 381-388.

Bellón, B., Blanco, J., De Vos, A., Roque, F., Pays, O., Renaud, P. 2020. Integrated landscape change analysis of protected areas and their surrounding landscapes: application in the Brazilian Cerrado. *Remote Sens.* 12(1413), 2-36.

Carvalho, A.; Silva, B.; Machado, A.; Santarossa, M.; Paganini, W. 2022. A ocorrência de cafeína em águas superficiais para abastecimento público. *Eng. Sanit. Ambient.* 27 (4), Jul-Aug 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210201>.

Cimmino, I., Fiory, F., Perruolo, G., Miele, C., Beguinot, F., Formisano, P., Oriente, F. 2020. Potential Mechanisms of Bisphenol A (BPA) Contributing to Human Disease. *International Journal of Molecular Sciences.* 2020; 21(16):5761. <https://doi.org/10.3390/ijms21165761>.

Clayman, C., Connaughton, V. 2022. Neurochemical and Behavioral Consequences of Ethanol and/or Caffeine Exposure: Effects in Zebrafish and Rodents. *Curr Neuropsychopharmacol.* 2022 Mar 4; 20(3): 560–578. Published online 2022 Mar 4. doi: 10.2174/1570159X1966621111142027.

Cunha, D. 2018. Avaliação da ocorrência e impacto de contaminantes no sistema lagunar Itaipu-Piratininga, Estado do Rio de Janeiro – Brasil. Tese (doutorado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT> .2018.d.11302153773.

Freo, U., Ruocco, C., Valerio, A., Scagnol, I., Nisoli, E. 2021. Paracetamol: A Review of Guideline Recommendations. *Journal of Clinical Medicine*. 2021; 10(15):3420. <https://doi.org/10.3390/jcm10153420>.

Gao, Y., Zhou, J., Rao, Y., Ning, H., Zhang, J., Shi, J., Gao, N. 2022. Comparative study of degradation of ketoprofen and paracetamol by ultrasonic irradiation: Mechanism, toxicity and DBP formation. *Ultrasonics Sonochemistry* Volume 82, January 2022, 105906.

Gomes, J. 2018. Análise da ocorrência do hormônio estrogênico, 17 α -etinilestradiol, o Lago Paranoá. Dissertação (mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Brasília, 2018.

Hajializadeh, Z., Khaksari, M. The protective effects of 17- β estradiol and SIRT1 against cardiac hypertrophy: a review. *Heart Fail Rev* 27, 725–738 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10741-021-10171-0>.

Heidari, A., Shahbazi, A., Aminabhavi, T., Barceló, D., Rtimi, S. 2023. A systematic review of clay-based photocatalysts for emergent micropollutants removal and microbial inactivation from aqueous media: Status and limitations. *Journal of Environmental Chemical Engineering* Volume 10, Issue 6, December 2022, 108813.

Herrmann, . A.; Costa, A.; Martinhuk, . N.; Armas, . R. Utilização de Bactérias Como Alternativa Para Biodegradação Dos Desreguladores Endócrinos 17 Beta-Estradiol e 17 Alfa-Etinilestradiol. *Epitaya E-books*, [S. l.], v. 1, n. 27, p. 163-174, 2023. DOI: 10.47879/ed.ep.2023670p163. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/635>. Acesso em: 23 jan. 2024.

Khan, H., Rehman, M., Malik, R. Fate and toxicity of pharmaceuticals in water environment: An insight on their occurrence in South Asia, *Journal of Environmental Management*, Volume 271, 2020, 111030, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111030>.

Klaica, M., Jirsa, F. 2022. 17 α -Ethinylestradiol (EE2): concentrations in the environment and methods for wastewater treatment – an update. DOI: 10.1039/D2RA00915C (Review Article) *RSC Adv.*, 2022, 12, 12794-12805.

Koerich, P.; Kael, I.; Vieira, M.; Barbosa, S.; Silva, M.; Primel, E.; Radunz, A.; Cabrera, L. 2021. DETERMINAÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES NO RIO LONTRA (SALTO DO LONTRA – PARANÁ). *Biodiversidade* - v.20, n.1, 2021 - pág. 106.

Leung, S., Shukla, P., Chen, D., Eftekhari, E., An, H., Zare, F., Ghasemi, N., Zhang, D., Nguyen, N., Li, Q. 2022. Emerging technologies for PFOS/PFOA degradation and removal: A review. *Science of The Total Environment*, v. 827, 2022, p. 153669. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153669>.

Liu, N., Jin, X., Feng, C., Wang, Z., Wu, F., Johnson, A., Xiao, H., Hollert, H., Giesy, J., 2020. Ecological risk assessment of fifty pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Chinese surface waters: a proposed multiple-level system. *Environ. Int.* 136, 105454. PMID:32032889. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2019.105454>.

Machado, R., Pompei, L., Giribela, A., Giribela, C. 2011. Drospirenone/ethinylestradiol: a review on efficacy and noncontraceptive benefits. *Women's Health*, 2011, 7, 19–30.

Marson, E., Paniagua, C., Gomes Júnior, O., Gonçalves, B., Silva, V., Ricardo, I., Starling, M., Amorim, C., Trovó, A., 2022. A review toward contaminants of emerging concern in Brazil: Occurrence, impact and their degradation by advanced oxidation process in aquatic matrices. *Sci. Total Environ.* 836, 155605. PMID:35504382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155605>.

Petteffi, G., Fleck, J., Kael, I., Rosa, D., Antunes, M., Linden, R., 2019. Ecotoxicological risk assessment due to the presence of bisphenol A and caffeine in surface waters in the Sinos River Basin - Rio Grande do Sul – Brazil. *Braz. J. Biol.* 79(4), 712-721. PMID:30427383. <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.189752>.

Porretti, M., Arrigo, F., Di Bella, G., & Faggio, C. (2022). Impact of pharmaceutical products on zebrafish: An effective tool to assess aquatic pollution. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 261, 109439. ISSN 1532-0456.

Rapp-Wright, H.; Rodríguez-Mozaz, S.; Álvarez-Muñoz, D.; Barceló, D.; Regan, F.; Barron, L.P.; White, B. 2023. International Comparison, Risk Assessment, and Prioritisation of 26 Endocrine Disrupting Compounds in Three European River Catchments in the UK, Ireland, and Spain. *Molecules* 2023, 28, 5994. <https://doi.org/10.3390/molecules28165994>.

Repantis, D., Bovy, L., Ohla, K. 2020. Cognitive enhancement effects of stimulants: a randomized controlled trial testing methylphenidate, modafinil, and caffeine. *Psychopharmacology* 238, 441–451 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00213-020-05691-w>.

Rezende, A. 2022. Avaliação de risco ambiental associado a produtos Farmacêuticos e desreguladores endócrinos em águas Superficiais brasileiras. Dissertação (mestrado) apresentada à Universidade Federal de Viçosa, MG.

Wan, Y., Chai, B., Wei, Q., Hayat, W., Dang, Z., Liu, Z. 17 α -ethynylestradiol and its two main conjugates in seven municipal wastewater treatment plants: Analytical method, their occurrence, removal and risk evaluation. *Science of The Total Environment*, v. 812, 2022. p. 152489. ISSN 0048-9697.

Xiao, C., Wang, L., Zhou, Q., Huang, X. 2020. Hazards of bisphenol A (BPA) exposure: A systematic review of plant toxicology studies. *Journal of Hazardous Materials* Volume 384, 15 February 2020, 121488.

Material Suplementar (Busca 1 e 2)

NUM	Nome	Categoria	Ano de publicação	Matriz estudada	Estado Brasileiro	Micropoluentes estudados
100	Membanas compostas de poliacrilonitrila e carvão ativado em pó superfino: preparação, caracterização e avaliação da eficiência de rejeição do diclofenaco	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	SC	diclofenaco
101	Avaliação de risco ecológico da Lagoa de Jacarepaguá – RJ: presença de aditivos plásticos	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	ÁGUA	RJ	benzofenona
102	Remoção da atividade estrogênica por cloração	Artigo científico	2020	Esgoto	MG	17- β -estradiol
103	Uso de esquelito de coral sol na remediação ambiental: remoção de contaminantes aniônicos, fármacos e aditivos plásticos em efluentes líquidos	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	RJ	Benzo fenona
104	ANTIMICROBIANOS COMO POLUIENTES EMERGENTES: UMA ABORDAGEM CRÍTICA ACERCA DOS ASPECTOS JURÍDICOS, SOCIAIS E AMBIENTAIS À LUZ DA LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	RJ	ciprofloxacino
105	Avaliação da adsorção de tetraciclina em adsorvente convencional e modificado com ferro, sulfato de cobre e período de hidrólise: análise regenerativa e aplicação em mal	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	RS	tetraciclina
106	EFICIÊNCIA DE UM REATOR BATELADA SEQUENCIAL COMBINADO COM UV/H2O2 PARA REMOÇÃO DE 17 α -ETINILESTRADIOL (EE2) E 17 β -ESTRADIOL (E2) EM ESGOTO	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Esgoto	RJ	17 α -ETINILESTRADIOL
107	Remoção de fipronil por processos oxidativos avançados utilizando sulfito ativado por cobalto imobilizado em sílica	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	MG	fipronil
108	Occurrence of antimicrobials in surface and wastewater in the Municipality of Rio de Janeiro: an environmental and public health vulnerability issue	Artigo científico	2021	Esgoto	RJ	ciprofloxacina
109	Avaliação da biopersistência e da remoção de fármacos do ambiente aquático: um estudo de segurança hídrica da sub-bacia do Rio do Peixe	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	ÁGUA	MG	ciprofloxacino
110	Avaliação da presença de fármacos no esgoto sanitário e avaliação ecotoxicológica pós-tratamento	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Esgoto	SP	ibuprofeno
111	Medicamentos psicotípicos em matizes aquosos: ocorrência e remoção pela fotocatalise mediada por TiO2 e composto TiO2/carvão ativado	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Água e Esgoto	RJ	citalopram
112	Uso de carbono micro/nanoestruturado híbrido na remediação de ecossistemas aquáticos contaminados por fármacos psicotrópicos utilizando o peixe-zebra como biossensor	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	ÁGUA	DF	fluoxetina
113	Estimativa do consumo e predição da concentração ambiental de diazepam via epidemiologia do esgoto	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Esgoto	DF	diazepam
114	Remoção de bisfenol A por fotocatalise heterogênea e avaliação ecotoxicológica pós-tratamento	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	MG	bisfenol A
115	II-175- AVALIAÇÃO DA BIODEGRADABILIDADE E AÇÃO DE EFEITOS INIBITÓRIOS ASSOCIADOS À DIGESTÃO ANAERÓBIA DE FÁRMACOS	Artigo científico	2019	Água e Esgoto	MG	betametazona
116	Desenvolvimento analítico e quantificação de fármacos e defensivos agrícolas no rio Paraíba do Sul	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	ÁGUA	SP	caféina
117	Avaliação da remoção de bisfenol A no tratamento combinado de esgoto doméstico e laviação de aterro pelo processo de todo ativado	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Esgoto	RJ	bisfenol A
118	Biodegradação de hormônios por bactérias com potencial aplicação no tratamento de efluentes sanitários: revisão sistemática e estudo de caso	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Esgoto	RJ	17 α -etiolestradiol
119	CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL POR EFLUENTES E MICROPOLUIENTES: EFEITOS TOXICOLÓGICOS SOBRE PEIXES DA ESPÉCIE Cyprinus carpio	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	RS	2,4-D
120	Avaliação da estrogenicidade, ecotoxicidade e caracterização de sedimentos de praias em Angra dos Reis	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	RJ	bisfenol-A
121	Desenvolvimento e validação de metodologia por UPLC-MS/MS para determinação de produtos farmacêuticos, produtos de cuidados pessoais e desreguladores endócrinos na bacia hidr	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2020	Água e Esgoto	RJ	Trimetoprim
122	Avaliação da eficiência da remoção do etilparabeno por adsorção em carvão ativado e em bagaço de cana e testes de toxicidade com organismos zooplancônicos de água doce	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	ÁGUA	SP	etilparabeno
123	Remoção de Carbamazepina em soluções aquosas por adsorção em carvão ativado em pó: avaliação da toxicidade crônica	Artigo científico	2020	Água e Esgoto	RJ	Carbamazepina
124	Utilização de adsorventes à base de sílica para remoção de contaminantes orgânicos em meios aquosos	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	MG	azul de metileno
125	Fitorremediação do hormônio feminino (EE2) pela microalga Chlorella vulgaris	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	RJ	17- α etinilestradiol
126	Aplicação da fotocatalise heterogênea na remoção do hormônio 17 α - etinilestradiol	Artigo científico	2019	Água e Esgoto	PB	17- β etinilestradiol
127	Estudo do processo tóxico e remoção de digoxina e redução da toxicidade	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	PB	digoxina
128	Desempenho de sistema combinado anaeróbio-aeróbio-ândico sob diferentes condições operacionais na remoção de nutrientes e micropoluentes	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2020	Água e Esgoto	PR	paracetamol
129	Produção e caracterização de bioarvão de bagaço de laranja para utilização no pós-tratamento de água residual	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Esgoto	SE	Tetraciclina
130	Avaliação da atividade estrogênica em efluente da pecuária leiteira	Artigo científico	2018	Esgoto	MG	17 β -Estradiol
131	Degradação de tricloro e 2,4-diclorodifenileno p-dioxina via sistema Fenton/Na2O2/UV	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	SP	triclorfenol
132	Determinação de pesticidas organoclorados e fármacos em matizes ambientais utilizando QuEChERS, extração líquido-líquido (LLE) e extração em fase sólida (SPE)	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	SP	Aldrin
133	ESTUDO ECOTOXICOLÓGICO DE MEDICAMENTOS ANTIRETROVIRAIS: CONCENTRAÇÕES AMBIENTAIS ESTIMADAS E EFEITOS BIOLÓGICOS EM OURIÇO-DO-MAÍ (Echinomaster lucunter)	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	SP	atazanavir
134	Ocorrência e ecotoxicidade de antidepressivos residuais em amostras do Rio Piracicaba (SP)	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	SP	fluoxetina
135	Estudo da poluição hídrica em esteleamento de laranja em Guarapiranga, SP, causado pela presença de HPAS, n-alcenos e contaminantes emergentes	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	PB	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
136	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos em Microplásticos de Praias do Litoral Brasileiro	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	PA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
137	Avaliação da degradação de compostos emergentes presentes em efluente de uma Universidade mediante processo H2O2/UV	Artigo científico	2020	Esgoto	SE	17- α etinilestradiol
138	Estudo da eficiência dos processos C/UV e H ₂ O ₂ /UV na degradação de bisfenol-A, 17 β estradiol e 17 α etinilestradiol: avaliação da atividade estrogênica e toxicidade	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e Esgoto	RJ	bisfenol-A
139	Degradação do antibiótico ciprofloxacina por H2O2 eletrogerado eletroquimicamente em eletrodo de irídio gasoso	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2020	Esgoto	SP	ciprofloxacina
140	OCCORRÊNCIA DE PARABENOS NAS ÁGUAS DO RIO ITAUM MIRIM	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	PB	Metilparabeno
141	Avaliação da qualidade de água e presença de compostos emergentes em rios no semárido pernambuco	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	ÁGUA	PE	diclofenaco
142	CONTAMINANTES EMERGENTES E PESTICIDAS EM ÁGUA SUPERFICIAL E GENOTOXICIDADE EM TILÁPIAS (OREOCROMIS NILOTICUS), NA LAGOA DE JACAREPAGUÁ-RJ	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	ÁGUA	RJ	ibuprofeno
143	Avaliação do risco ambiental da fluoxetina em sedimentos marinhos para invertebrados aquáticos	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	ÁGUA	SP	fluoxetina
144	ESTROGENIC ACTIVITY AND ENDOCRINE DISRUPTOR COMPOUNDS DETERMINED IN GUANABARA BAY (BRAZIL) BY YEAST ESTROGEN SCREEN ASSAYS AND CHEMICAL ANALYSES	Artigo científico	2021	ÁGUA	RJ	bisfenol A
145	Removal of atrazine herbicide through granular activated carbon filters associated with microorganisms in drinking water treatment	Artigo científico	2021	ÁGUA	SP	Atrazine
146	Aplicação de carvão pulverizado e óxido de grafeno na remoção de bisfenol A da água	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água	RJ	Bisfenol A
147	Biotos-cruzais (sustitua quaternária) da Bala de sepeita - RJ, Brasil: Variação temporal da bioacumulação de compostos organoclorados e sua possível influência no evento de mortalidade	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água	RJ	Bifenilas policloradas (PCBs)
148	Restos de leite industrializado em esteleamento de laranja em Guarapiranga, SP, causado pela presença de HPAS, n-alcenos e contaminantes emergentes	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	PA	Alcancenos
149	Projeto e avaliação de um reator eletroquímico para o processo oxidativo avançado de fármacos presentes em efluentes domésticos.	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Esgoto	MS	Ciprofloxacina
150	Biodegradação dos pesticidas esfenvalerato, espirodifenol, tiamectoxam e imidacloprido por linhagens bacterianas isoladas do cerrado reforestado e cultura da laranja	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Esgoto	SP	espirodifenoleno
151	Remoção de contaminantes emergentes via sistema eletroquímico fotocatalítico	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	SP	Naproxeno
152	Estudo da remoção do pesticida metomil em efluentes simulados por biossorcção em bagaço de laranja residual	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água	GO	metomil
153	Avaliação dos efeitos tóxicos individuais e associados de herbicidas à base de glifosato e imazetapir sobre organismos não-alvo	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	ÁGUA	GO	glifosato
154	DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DE CONTAMINANTES AMBIENTAIS UTILIZANDO DISPOSITIVO MICROFLUÍDICO E TÉCNICAS DE DETECÇÃO ELETROQUÍMICAS	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	MS	benzovindilifuril (BZN)
155	Adsorção do corante tartrazina em carvão ativado de casca de banana nanica	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e esgoto	RJ	tartrazina
156	Isolamento de bactérias degradadoras de bisfenol A do ambiente estéril da Baía da Santista	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água	SP	Bisfenol A
157	Remoção de diclofenaco em água de abastecimento por adsorção em material de baixo custo	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Esgoto	SP	diclofenaco
158	Estudo da adsorção de herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético em processo contínuo e descontínuo utilizando-se de carvão ativo granular	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e esgoto	SP	diclorofenoxiacético
159	Estratégias de tratamento de resíduos químicos gerados na FCF/USP	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Esgoto	SP	acetonitrila
160	Influência da oxigenação e adição de fonte externa de carbono na remoção de nutrientes e contaminantes emergentes em sistema biológico AOA	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Esgoto	PR	17 α -etinilestradiol
161	Aplicação de índice de qualidade de água subterrânea em ambiente de percolados orgânicos na região de Camapari - BA	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água	BA	Cloreto de vinila
162	Biodegradação anaeróbia da atrazina em diferentes condições de oxirredução	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Água e esgoto	SP	metilfenidato
163	Efeitos do metilfenidato sobre o sistema dopaminérgico, comportamento e estresse oxidativo em Oreochromis niloticus	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e esgoto	SP	bisfenol-A
164	Síntese e caracterização de material híbrido composto por partículas fotocatalíticas ligadas por hidroxuritanas	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e esgoto	MG	fumarato de tereovitril desoprola
165	Toxicidade ambiental e degradação do antirretroviral fumarato de tereovitril desoprola	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e esgoto	MG	cloranfenicol
166	Análise da adsorção de contaminantes orgânico e inorgânicos de amostras aquosas em diferentes biossorcventes	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e esgoto	SP	paracetamol
167	Degradação de fármacos em efluente de uma estação de tratamento de esgoto sanitário utilizando processos avançados	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Esgoto	RS	caféina
168	Degradação de fármacos de interesse ambiental utilizando-se o processo foto-Fenton assistido por lâmpada de LED UV/vis	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e esgoto	PR	Losartana
169	Otimização de carvão a partir de casca de soja e aplicação na adsorção de herbicidas	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e esgoto	PR	aminopiradife
170	Avaliação da remoção de agrotóxicos por biorreator de membrana e pós-tratamento de carvão ativado, osmose reversa e ozonização	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Esgoto	PB	2,4-D
171	Degradação dos fármacos Cetoprofeno, Tenoxicam e Meloxicam por processos oxidativos avançados	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2021	Água e esgoto	PR	cetoprofeno
172	AVALIAÇÃO DO PROCESSO ELETROQUÍMICO NA DEGRADAÇÃO DE AMOXICILINA E DETERMINAÇÃO DE TOXICIDADE DOS SUBPRODUTOS GERADOS	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e esgoto	GO	amoxicilina
173	Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na adsorção de fipronil	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e esgoto	MG	fipronil
174	Degradação oxidativa da fluoxetina utilizando rejeito de mineração como catalisadores	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e esgoto	MG	fluoxetina
175	Estudo da degradação do paracetamol (acetaminofeno) por fotocatalise heterogênea Amazônicas	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água	AM	PARACETAMOL
176	Fármacos como poluentes emergentes em ambientes aquáticos: panorama de consumo na Região Metropolitana de São Paulo e quadro comparativo de políticas públicas entre países	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e Esgoto	SP	17- β -estradiol
177	Utilização do bioarvão de bagaço de laranja na remoção de tetraciclina em água residual	Artigo Científico	2021	Esgoto	SE	tetraciclina
178	Desenvolvimento de método de análise de carvão granular reduzido para determinação de 17 α -etinilestradiol	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	SE	17- α -etinilestradiol
179	Infraestrutura Azul-Verde nas cidades: adaptação às mudanças climáticas e redução da poluição hídrica por micropoluentes farmacêuticos	Artigo Científico	2021	Água e Esgoto	PR	Diclofenac
180	Ocorrência de Atrazina em águas no Brasil e remoção no tratamento da água: revisão sistemática	Artigo Científico	2018	Água e Esgoto	RJ e MG	atrazina
181	Ocorrência e remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em sistemas de abastecimento de água na Região Metropolitana de Belo Horizonte.	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água	MG	ibuprofeno
182	Presença de fármacos em águas na região de Belo Horizonte: uma análise clínicamente	Artigo Científico	2018	Água e Esgoto	MG	benzofenazepina
183	AVALIAÇÃO DA ESTROGENICIDADE E ECOTOXICIDADE NOS SEDIMENTOS EM ÁGUA SUPERFICIAL DA BAIÁ DE GUANABARA	Artigo Científico	2018	Água e Esgoto	RJ	Estroona
184	Degradação fotocatalítica de poluentes emergentes empregando TiO2 imobilizado	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Água e Esgoto	PR	amoxicilina
185	Avaliação do comportamento do Alendadozol e Sulfado de Alendadozol em Latossolo vermelho amarelo e remoção dos fármacos por Fotocatalise Heterogênea em solução aquosa	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e Esgoto	MG	alendadozol
186	DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE BISFENOL A E ETINILESTRADIOL EM ÁGUA DE E ETINILESTRADIOL EM ÁGUA DE E ETINILESTRADIOL EM ÁGUA DE	Artigo Científico	2019	Água e Esgoto	MG	BISPHENOL A
187	Avaliação do desempenho de argilas orgânicas no tratamento de águas contendo Atrazina e 2,4-D	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e Esgoto	DF	Atrazina
188	Fármacos em águas residuais: efeitos ambientais e remoção em wetlands construídos	Artigo Científico	2018	Esgoto	SC	dipirona
189	Bases conceituais e ferramentas analíticas à determinação do impacto do estrogênio 17 α -etinilestradiol no metabolismo da alga Ulva lactuca (Chlorophyta)	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água e Esgoto	SC	17 α -Etinilestradiol
190	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE ESTROGÊNICA EM EFLUENTE DA PECUÁRIA LEITEIRA: FASE SÓLIDA E LÍQUIDA	Artigo Científico	2021	Esgoto	MG	estrona (E1)
191	Qualidade das mananciais de recursos hídricos superficiais e a atividade agrícola: o caso da região da Estação Ecológica de Águas Emendadas/DF.	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	DF	metomil
192	Avaliação dos Efeitos de Fotoprotetores em Organismos Aquáticos	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água	PE	2-ethylhexil
193	BIOSSORÇÃO DOS ANTIBIÓTICOS CEFALEXINA E CIPROFLOXACINA EM EFLUENTES POR Penicillium purpureum SCHUMACK, 1827 (POALES: POACEAE) (CAPIM ELEFANTE)	Artigo Científico	2020	Água	PE	CEFALEXINA
194	Occurrence of emerging contaminants and analysis of estrogenic activity in the water and sediments from two coastal lagoons in south-eastern Brazil	Artigo Científico	2020	Água	RJ	bisphenol A
195	Avaliação em escala piloto do tratamento de efluentes sanitários e rejeição dos bisfenol A e cildropropesopina por membranas de nanofiltração	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	DF	caféina
196	Avaliação da degradação do antibiótico ceftriaxona em água pela aplicação dos processos oxidativos avançados período de Hidrogênio e Fenton, associados ou não à radiação ultravioleta	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água	SP	ceftriaxona
197	Avaliação da capacidade de adsorção de sulfametoxazol em argila Pirangi do estado de Sergipe	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	SE	sulfametoxazol
198	Quantificação de hormônios estrogênicos em esgoto sanitário por HPLC-UV e avaliação da degradação por processos oxidativos avançados	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Esgoto	PR	estrona (E1)

Material Suplementar (Busca 1 e 2)

NUM	Nome	Categoria	Ano de publicação	Matriz estudada	Estado Brasileiro	Micropoluentes estudados
199	Tratamento de águas contaminadas por atrazina via sistema fototefon utilizando lâmpada led como fonte de energia: eficiência na remoção, mecanismo e degradação	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	PR	
200	Remoção de desreguladores endócrinos em água de abastecimento	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água	MG	estrona (E1)
201	oxidação e riscos ecológicos das tintas anti-incrustantes de terceira geração: Toxicidade e efeitos da diclofluamida sobre organismos marinhos	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água	SP	diclofluamida
202	Monitoramento de fármacos em água superficial e efluente de estação de tratamento de esgoto no município de Dourono - SP	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e Esgoto	SP	diclofenaco
203	Estudo do processo UV/H2O2 e da fotólise UVC na degradação do agrotóxico Lorsban® com acompanhamento da ecotoxicidade	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	PR	Lorsban
204	Monitoramento e avaliação da eficiência de um reator piloto Bardenpho modificado-IFAS no tratamento de esgoto real: remoção de benzenofenona e dietilftalato	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Esgoto	RJ	Benzenofenona
205	Remoção de herbicida atrazina por meio de filtros de carvão ativado granular associados com microrganismos no tratamento de água para abastecimento	Artigo Científico	2021	Água	MS e SP	atrazina
206	Avaliação de contaminantes no rio iguaçu: variação da concentração de cafeína, HSF5 e do IGOI	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água	PR	cafeína
207	Assessing the presence of endocrine disruptors and markers of anthropogenic activity in a water supply system in northeastern Brazil	Artigo Científico	2019	Água	SE	diethyl phthalate
208	Obtenção de carbonos mesoporosos funcionalizados para aplicação em sensores eletroquímicos na detecção de contaminantes emergentes	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	RN	cafeína
209	Avaliação da tecnologia de membranas na remoção do contaminante emergente Fluoxetina em amostras de água	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2020	Água	RS	Fluoxetina
210	Cafeína, fármacos, hormônios e produtos de cuidados pessoais no Rio Palmital - PR	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água	PR	Cafeína
211	Produção e caracterização de material adsorvente a partir de lodo de estação de tratamento de água para a remoção de disruptores endócrinos	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água	SP	17β estradiol
212	Avaliação da presença de microcontaminantes de preocupação emergente, por GC-MS, e de elementos inorgânicos, por TXRF, nas águas superficiais da Bacia do Rio Paraopeba/MG.	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água	MG	diclofenaco
213	Degradação do antibiótico bacitracina z-níca em meio aquoso através de processos oxidativos avançados.	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e Esgoto	SP	bacitracina z-níca
214	ESTUDO DE REMOÇÃO DE FÁRMACOS EM SOLUÇÃO AQUOSA POR PROCESSOS DE NANOFILTRAÇÃO E OSMOSE INVERSA E DEGRADAÇÃO POR PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Água e Esgoto	RJ	paracetamol
215	Explorando diferentes energias em processos fotolíticos e fotocatalíticos visando à degradação de fármacos	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água e Esgoto	MG	fluoxetina
216	Estudo da biodegradação bacteriana do herbicida glifosato por microbiota de corpo hídrico e por coleção laboratorial e análise da presença de glifosato em corpo hídrico do município de Guai	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água	SP	glifosato
217	Degradação de parabenos empregando biorreator com membranas e processo oxidativo baseado em persulfato.	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	SP	metilparabeno
218	Remoção da estrogenicidade utilizando o processo de foto-Fenton LED em efluente de estação de tratamento de esgoto doméstico	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Esgoto	MG	Ibuprofeno
219	AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS PARA A REMOÇÃO DE COMPOSTOS EMERGENTES	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Esgoto	SP	cafeína
220	Emprego de tratamentos oxidativos e osmose inversa para redução da ecotoxicidade do tensativo cloreto de hexadeciltrimetilamônio	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Esgoto	RJ	cloreto de hexadeciltrimetilamônio
221	Estudo da remoção de diclofenaco sódico por processo de adsorção	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	PR	diclofenaco sódico
222	Processos oxidativos avançados na degradação de hormônios sexuais femininos: cinética, produtos e toxicidade	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	PR	estrona (E1)
223	Biotransformação / Biodegradação do Antibiótico Norfloxacinol por Fungos de Ambiente Marinho	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água	SP	norfloxacino
224	Remoção do Clonazepam em águas para consumo humano por Processos Oxidativos Avançados (POAs)	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água	RJ	Clonazepam
225	AVALIAÇÃO DE VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA E CONTAMINANTES AMBIENTAIS EMERGENTES EM ÁGUAS DE CONSUMO HUMANO NO RIO GRANDE DO SUL	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água	RS	Clonazepam
226	Efeito estressor do glifosato e paraquate em Saccharomyces cerevisiae	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água	PR	glifosato
227	Biodegradação do cloranfenicol por fungos endofíticos isolados de Bertholletia excelsa (Castanha-do-Brasil)	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Esgoto	AP	cloranfenicol
228	Avaliação da eficiência da filtração em margem na remoção de resíduos farmacêuticos potencialmente ativos em um trecho do Rio Capibaribe	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água	PE	diclofenaco
229	Efeitos neuroendócrinos e comportamentais do hormônio estrogênio em Zebrafish	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2018	Água e Esgoto	SC	17α-etinilestradiol
230	Reatores biológicos submetidos a diferentes carregamentos de água residual de suinocultura: remoção de compostos orgânicos emergentes, matéria orgânica e nutrientes	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Esgoto	MG	gemfibrozil
231	Adsorção da cafeína em carvão ativado da folha de coqueiro (Cocos nucifera L.)	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	AL	cafeína
232	Desempenho de wetlands construídos preenchidos com resíduos da construção civil na remoção de matéria orgânica, ibuprofeno, paracetamol e etinilestradiol de esgotos sanitários	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Esgoto	PR	paracetamol
233	Fotodegradação do triclosan com CAT103 sintetizado a partir da casca de ovo galináceo	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	PR	triclosan
234	ESTRUVITA: IDENTIFICAÇÃO DE POTENCIAIS PERIGOS E EVENTOS PERIGOSOS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO, PERCEPÇÃO E ACEITABILIDADE DE AGRICULTORES QUANTO AO SEU USO AGRÍCOL	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água e Esgoto	ES	paracetamol
235	Catalisadores de Ag/Nb2O5 imobilizados: uma alternativa para a degradação do 17α-etinilestradiol em processo contínuo	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	PR	17α-etinilestradiol
236	Aplicação dos Processos Eletroquímicos Oxidativos (PEOs) no tratamento de efluentes farmacêuticos utilizando ânodo de DDB	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2021	Água e Esgoto	PR	Cafeína
237	Avaliação do risco ambiental da fluoxetina em sedimentos marinhos para invertebrados aquáticos	Artigo Científico	2019	Água	SP	fluoxetina
238	Remoção de antibióticos em efluentes secundários utilizando fotobiorreatores microalgas-bactérias.	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2020	Água e Esgoto	MG	sulfametoxazol
239	Utilização de TiO2 microestruturado em processos de fotodecomposição solar de enrofloxacina e oxitetraciclina de águas contaminadas	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água e Esgoto	SP	enrofloxacina
240	Remoção de sulfametoxazol por adsorção em biocarvão ativado das folhas da mandioca (Manihot esculenta Crantz) em meio aquoso	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	PR	sulfametoxazol
241	Produção, imobilização por Cross-Linked Enzyme Aggregates (CLEAS) e aplicação de lacases fúngicas na biodegradação de ciprofloxacino	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2021	Água e Esgoto	PR	ciprofloxacino
242	Adsorção de sulfametoxazol usando carvão ativado produzido a partir de sementes de graviola (Annona muricata): modelagem e simulação	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	SE	sulfametoxazol
243	Estudo da degradação fotocatalítica do fármaco Captopril pelo composto de nanopartículas de TiO2 - perilla expandida	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2019	Água e Esgoto	RN	Captopril
244	Uso de material de baixo custo como adsorvente para remoção de naproxeno em água de abastecimento	Trabalho acadêmico (Mestrado)	2020	Água	SP	naproxeno
245	Ocorrência de poluentes emergentes nos rios Piraí, Paraíba do Sul, Guandu e na água de abastecimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2018	Água	RJ	estrona
246	Membranas poliméricas para remoção de desreguladores endócrinos em amostras aquosas	Trabalho acadêmico (Doutorado)	2019	Água e Esgoto	RS	estrona

Material Suplementar (Busca 2)

NUM	Nome	Categoria	Ano de publicação	Matriz estudada	Micropoluentes estudados
1	Occurrence, control and fate of contaminants of emerging concern in environmental compartments in Brazil	Artigo Científico	2019	Água e Esgoto	paracetam atenolol ibuprofen cephalaxil bisphenol 17 α -ethyn 17 β -estradiol caffeine
2	Development and application of a SPE-LC-QTOF method for the quantification of micropollutants of emerging concern in drinking waters from the Brazilian capital	Artigo Científico	2020	Água e Esgoto	DEET bisphenol atrazine carbamaz paraxanthi mefenami nicotine atenolol sulfameth estrone 17 β -estra estriol 17 α -ethynylestradiol
3	Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America	Artigo Científico	2019	Água e Esgoto	bisphenol 4-nonylph triclosan (estrone (E estradiol) ethinylestr tetracyclin amoxicillin norfloxaci ampicillin imipenem
4	Occurrence and removal of micropollutants in full-scale aerobic, anaerobic and facultative wastewater treatment plants in Brazil	2021	Esgoto	triclosan	17 α -ethyn 17 β -estra estrone estriol
5	Impact of agricultural runoff and domestic sewerage discharge on the spatial-temporal occurrence of emerging contaminants in an urban stream in São Paulo	Artigo Científico	2021	Esgoto	malathion deethtylar deslorspro fipronil ametryn 2-hidroxyl diuron
6	Pharmaceuticals and personal care products in a Brazilian wetland of international importance: Occurrence and environmental risk assessment	Artigo Científico	2020	Esgoto	caffeine
7	Spatio-temporal evaluation of emerging contaminants and their partitioning along a Brazilian watershed	Artigo Científico	2018	Água e Esgoto	atenolol ibuprofen diclofenac propranol estrone triclosan
8	Occurrence of contaminants of emerging concern and their risks to the Pantanal-Sul-Mato-Grosso aquatic biota, Brazil	Artigo Científico	2020	Água e Esgoto	estrone estradiol hexaxone etubuthun azoxystrobin carbendazim tebuconaz fipronil caffeine bisphenol A
9	Occurrence of organic micropollutants in an urbanized sub-basin and ecological risk assessment	Artigo Científico	2020	Água	Ibuprofen trimethop sulfameth bisphenol A
10	Assessment of Conventional Full-Scale Treatment for the Removal of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals Present in the Tibagi River (Paraná State, Brazil)	Artigo Científico	2021	Água	dexameth losartan estradiol diclofenac loratadine naproxen paracetam ethinylestr caffeine propranol diltiazem benzafibri promethazine
11	Water Quality and the Impact by Contaminants of Emerging Concern: The Case of Verde River in Campos Gerais	Artigo Científico	2022	Água	caffeine
12	Occurrence of Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Compounds in Brazilian Water and the Risks They May Represent to Human Health	Artigo Científico	2018	Água	amoxicillin
13	Occurrence and removal of drugs and endocrine disruptors in water supply systems in the metropolitan region of Belo Horizonte (Minas Gerais State, Brazil)	Artigo Científico	2022	Água	4-nonylphenol
14	Removal of micropollutants by UASB reactor and post-treatment by Fenton and photo-Fenton: Matrix effect and toxicity responses	Artigo Científico	2022	Esgoto	atrazine (ATZ)
15	Presence and risk assessment of pharmaceutically active compounds in neotropical small basins, Brazil	Artigo Científico	2021	Água	diclofenac
16	Ecological risk assessment of pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in Brazilian surface waters	Artigo Científico	2023	Água	Bisphenol-A
17	Ibuprofen and caffeine removal in vertical flow and free-floating macrophyte constructed wetlands, with Heliconia rostrata and Eichornia crassipes	Artigo Científico	2019	Esgoto	Ibuprofen
18	Occurrence of caffeine, fluoxetine, bezafibrate and levodihydroxine in surface freshwater of São Paulo State (Brazil) and risk assessment for aquatic life protection	Artigo Científico	2021	Água	caffeine
19	Determination of nine pharmaceutical active compounds in surface waters from Paranaíba River Basin in Brazil by UPLC-MS/MS	Artigo Científico	2018	Água	acetaminophen
20	The influence of solid-liquid coefficient in the fate of pharmaceuticals and personal care products in aerobic wastewater treatment	Artigo Científico	2018	Esgoto	fenofibrate
21	Aquatic concentration and risk assessment of pharmaceutically active compounds in the environment	Artigo Científico	2021	Água e Esgoto	Diclofenac
22	Behavior of Micropollutants in Polluting Units that Combine Sorption and Biodegradation Mechanisms to Improve the Quality of Activated Sludge Effluent	Artigo Científico	2018	Esgoto	estrone (E1)
23	Theoretical environmental risk assessment of ten used pharmaceuticals in Belo Horizonte, Brazil	Artigo Científico	2019	Água e Esgoto	clonazepam
24	Emerging contaminant occurrence and toxic effects on zebrafish embryos to assess the adverse effects caused by mixtures of substances in the environment	Artigo Científico	2021	Água	caffeine
25	Occurrence of 17 α -ethynylestradiol in Paranaí Lake watershed (Brazilia, Brazil): sewage, freshwater and treated water	Artigo Científico	2021	Água e Esgoto	17 α -ethynylestradiol
26	Comparison of 17 β -estradiol, bisphenol-A and caffeine concentration levels before and after the water treatment plant	Artigo Científico	2023	Esgoto	17 β -estradiol
27	Presence Of Non-Steroidal Anti-Inflammatories In Brazilian Semiárid Waters	Artigo Científico	2023	Água	Diguprone
28	Degradation of Caffeine by Heterogeneous Photocatalysis Using ZnO with Fe and Ag	Artigo Científico	2020	Água	Caffeine
29	Can high rate algal ponds be used as post-treatment of UASB reactors to remove micropollutants?	Artigo Científico	2020	Esgoto	EE2-ethynylestradiol
30	Assessment of Conventional Full-Scale Treatment for the Removal of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals Present in the Tibagi River (Paraná State, Brazil)	Artigo Científico	2021	Esgoto	bisphenol A
31	The impact of micropollutants on native algae and cyanobacteria communities in ecological filters during drinking water treatment	Artigo Científico	2022	Esgoto	diclofenac
32	Prioritization and environmental risk assessment of pharmaceuticals mixtures from Brazilian surface waters	Artigo Científico	2021	Água e Esgoto	norfloxacin
33	Estrogenic Hormones in São Paulo Waters (Brazil) and Their Relationship with Environmental Variables and Sinapsi alba Phytotoxicity	Artigo Científico	2020	Água	17 α -ethynylestradiol
34	Phenolic compounds seasonal occurrence and risk assessment in surface and treated waters in Minas Gerais—Brazil	Artigo Científico	2021	Água	2,3,4-trichlorophenol
35	Presence and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Hormones in Neotropical Small Basins, Brazil	Artigo Científico	2022	Água	caffeine
36	Analysis of the presence of anti-inflammatories drugs in surface water: A case study in Beberibe river - PE, Brazil	Artigo Científico	2019	Água	diclofenaco
37	Simultaneous evaluation of benzotriazoles, benzothiazoles and benzenesulfonamides in water samples from the impacted urban Jacarepaçu Lagoon System (Rio de Janeiro, Brazil) by liquid chromatography coupled to electrospray tandem mass spectrometry	Artigo Científico	2023	Água	Benzotriazoles
38	Development and Validation of an Analytical Method for the Detection and Quantification of Bromazepam, Clonazepam and Diazepam by UPLC-MS/MS in Surface Water	Artigo Científico	2019	Água	Bromazepam
39	Degradation of the micropollutant amoxicillin by photolysis and evaluation of the toxicity of byproducts generated in aquatic environments	Artigo Científico	2022	Água	amoxicillin
40	Biomass-derived adsorbents for caffeine removal from aqueous medium	Artigo Científico	2022	Água	caffeine
41	Assessment of the aerobic and anaerobic biodegradation of contaminants of emerging concern in sludge using batch reactors	Artigo Científico	2022	Esgoto	Ibuprofen
42	Unveiling the occurrence of contaminants of emerging concern in groundwater from urban setting: A combined multidisciplinary approach and self-organizing maps	Artigo Científico	2021	Água	atrazine
43	Occurrence of PPCPs in a Brazilian water reservoir and their removal efficiency by ecological filtration	Artigo Científico	2019	Água	paracetamol
44	Adsorption of aqueous phase contaminants of emerging concern by activated carbon: Comparative fixed-bed column study and in situ regeneration methods	Artigo Científico	2023	Esgoto	caffeine
45	Presence of antibiotic resistance genes and its association with antibiotic occurrence in Dilúvio River in southern Brazil	Artigo Científico	2020	Água	Asitromycin
46	Sustainable treatment of municipal secondary effluent from UASB systems by solar photo-Fenton: CECs removal and toxicity control	Artigo Científico	2023	Esgoto	acetaminophen
47	Diclofenac Toxicity Abatement in Wastewater with Solar Disinfection: A Study in the Rural Area of Brazil's Central-West Region	Artigo Científico	2021	Esgoto	Diclofenac
48	Alternative techniques for caffeine removal from wastewater: An overview of opportunities and challenges	Artigo Científico	2020	Esgoto	caffeine
49	Microcontaminants Removal in Constructed Wetlands with Different Baffle Arrangements and Cultivated with Pennisetum setaceum	Artigo Científico	2021	Esgoto	Ibuprofen
50	Sorption and desorption behavior of residual antidepressants and caffeine in freshwater sediment and sewage sludge	Artigo Científico	2022	Esgoto	citalopram
51	Rejection of pharmaceutical compounds from surface water by nanofiltration and reverse osmosis	Artigo Científico	2019	Água	Betametnasone
52	Amoxicillin removal by pre-denitrification membrane bioreactor (A/O-MBR): Performance evaluation, degradation by products, and antibiotic resistant bacteria	Artigo Científico	2020	ÁGUA e Esgoto	Amoxicillin
53	Optimization of Oxidation Process to Remove Psychoactive Drugs From Two Municipal Wastewater Treatment Plants	Artigo Científico	2022	Esgoto	bromazepam
54	Combination of solar photo-Fenton and adsorption process for removal of the anticancer drug Flutamide and its transformation products from hospital wastewater	Artigo Científico	2020	Esgoto	Flutamide
55	Adorção de contaminantes de preocupação emergente (CECs) em carvão ativado superfino	Artigo Científico	2022	Esgoto	atrazine
56	Synthesis of a novel magnetic composite based on graphene oxide, chitosan and organoclay and its application in the removal of bisphenol A, 17 α -ethynylestradiol and triclosan	Artigo Científico	2021	Água	bisphenol A
57	Occurrence, ecological risk assessment and prioritization of pharmaceuticals and abuse drugs in estuarine waters along the São Paulo coast, Brazil	Artigo Científico	2022	Água	benzoylcegonine
58	Combination of tertiary solar photo-Fenton and adsorption processes in the treatment of hospital wastewater: The removal of pharmaceuticals and their transformation products	Artigo Científico	2021	Esgoto	Chloramphenicol
59	Optimization of the conditions of dispersive liquid-liquid microextraction for environmentally friendly determination of bisphenols and benzophenone in complex water matrices by LC-MS/MS	Artigo Científico	2021	Esgoto	bisphenol A
60	Assessment of the Anaerobic-Oxic-Anoxic (AOA) system on the removal of pharmaceuticals and the effect of recirculation on denitrification process	Artigo Científico	2023	Esgoto	17 α -ethynylestradiol
61	Insights into sorption and molecular transport of atrazine, testosterone, and progesterone onto polyamide microplastics in different aquatic matrices	Artigo Científico	2023	Água	testosterone-TTR
62	Efficiency of the bank filtration technique for diclofenac removal: A review	Artigo Científico	2022	ÁGUA e Esgoto	diclofenac