

486 - POTENCIAL DE REÚSO POTÁVEL INDIRETO NO BRASIL

Mickaela Midon da Paixão⁽¹⁾

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

Ana Silvia Santos⁽²⁾

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 Associada da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Diretora Executiva do Instituto Reúso de Água.

Renata de Oliveira Pereira⁽³⁾

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).

Endereço⁽¹⁾: Rua Camaragibe 9 – Tijuca, Rio de Janeiro - RJ- Tel: +55 (21) 98309-5480 - e-mail: mickaelamidon@gmail.com

RESUMO

O reúso potável indireto da água configura-se como uma alternativa promissora para enfrentar a crescente escassez hídrica no Brasil, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Este estudo avaliou o potencial de transformação de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) em unidades de reúso potável, considerando sua infraestrutura existente, tecnologias empregadas e a proximidade geográfica com captações de água. A análise demonstrou que ETEs com tecnologias avançadas — como lodos ativados, processos com membranas e remoção biológica de nutrientes — localizadas em estados como São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná, possuem maior viabilidade para implementação do reúso potável indireto, dada sua capacidade populacional e importância estratégica. No entanto, desafios significativos persistem, como a presença de micropoluentes nos efluentes tratados e a baixa cobertura de tratamento de esgoto no país. A ausência de dados sobre vazões e condições dos corpos receptores também limita a análise de viabilidade. Conclui-se que a implementação do reúso potável indireto no Brasil requer uma abordagem integrada que envolva investimentos em infraestrutura, fortalecimento regulatório e monitoramento contínuo da qualidade da água, visando garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade dos recursos naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Água de Abastecimento, Esgotamento Sanitário, Segurança Hídrica.

INTRODUÇÃO

O reúso de água é a prática de reaproveitar água já utilizada para um novo propósito, minimizando a demanda sobre fontes hídricas naturais e promovendo a sustentabilidade dos recursos hídricos. Essa abordagem pode ser aplicada em diversas situações, como na irrigação de culturas agrícolas, na limpeza de ruas, em processos industriais e até mesmo no abastecimento de água potável, dependendo do tratamento que a água recebeu (GERRITY *et al.*, 2013). O reúso de água é uma estratégia fundamental para a gestão eficiente da água, especialmente em regiões afetadas por escassez hídrica, pois contribui para a redução do uso de águas de mananciais e diminui a quantidade de efluentes descartados no meio ambiente, promovendo a conservação dos recursos hídricos disponíveis (FUKASAWA; MIERZWA, 2020).

No Brasil, a cobertura de esgoto é um desafio significativo. Dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SNISA, 2023) indicam que apenas cerca de 50% da população tem acesso a um serviço adequado de coleta e tratamento de esgoto, o que agrava a crise hídrica no país e demanda soluções inovadoras. Nesse contexto, o reúso potável de água emerge como uma forma específica de reúso de água, envolvendo a reutilização de água tratada proveniente de esgoto para fins de abastecimento público, oferecendo uma alternativa viável e segura para mitigar a escassez de água potável. Essa prática pode ser dividida em duas categorias principais: o reúso potável direto e o indireto.

No reúso potável direto, a água tratada é inserida diretamente no sistema de abastecimento, garantindo que atenda a todos os padrões de qualidade exigidos. Por outro lado, no reúso potável indireto, a água tratada é liberada em corpos hídricos, como rios ou reservatórios, onde se mistura com água natural antes de ser captada para o consumo humano. Essa abordagem permite que processos naturais, como a filtração e a diluição, melhorem ainda mais a qualidade da água (DOW *et al.*, 2019). A importância do reúso potável reside não apenas na oferta de uma fonte adicional de água para abastecimento, mas também na promoção da segurança hídrica, na redução da pressão sobre os recursos hídricos e na contribuição para a sustentabilidade ambiental (PAIXÃO *et al.*, 2024).

No contexto brasileiro, a legislação específica sobre reúso de água ainda é incipiente e, no caso de reúso potável de água, inexistente. Uma exceção parcial é a regulamentação vigente no estado do Paraná, que, de maneira indireta, reconhece situações que podem ser classificadas como reúso potável indireto. De acordo com essa abordagem, o lançamento de efluente tratado em corpos hídricos superficiais configura-se como a modalidade de reúso ambiental de água. Caso haja, a jusante, uma captação para abastecimento público, esta condição caracteriza o que se denomina reúso potável indireto. Assim, o presente trabalho não se trata de um incentivo direto à prática do reúso potável, mas de um reconhecimento da situação como tal, a partir da combinação entre a outorga de lançamento, a qualidade da água no ponto de captação e a qualidade da água distribuída após o tratamento na ETA. Este conceito na legislação do Paraná demonstra que, mais do que estabelecer normas específicas para o reúso potável indireto, a legislação atual se apoia na regulação dos usos múltiplos da água e na garantia da qualidade da água distribuída à população. Nesse sentido, torna-se importante esclarecer que a prática denominada reúso potável indireto refere-se, sobretudo, a um enquadramento conceitual do uso da água.

OBJETIVOS

Objetivo Geral Avaliar o potencial de transformação das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) em estações de reúso potável no Brasil, considerando a infraestrutura existente e a disponibilidade de recursos hídricos.

Objetivos Específicos

- Mapear todas as ETEs em funcionamento no Brasil, catalogando dados sobre localização, capacidade de tratamento, tecnologias utilizadas e vazões de esgoto tratado.
- Levantar informações sobre as principais captações de água superficial, incluindo localização, capacidade, fontes de água e população atendida.
- Analisar as características das ETEs e sua capacidade de atender à população local, identificando quais unidades são mais adequadas para adaptação ao reúso potável.
- Avaliar as distâncias geográficas entre as ETEs e as captações de água, utilizando dados geoespaciais para identificar as unidades com maior viabilidade de transformação em estações de reúso potável.
- Estimar o número de habitantes que poderiam se beneficiar do reúso potável indireto, com base na população atendida pelas captações de água.

- Contribuir para a gestão de recursos hídricos no Brasil, promovendo soluções inovadoras para o abastecimento público e a segurança hídrica.

METODOLOGIA UTILIZADA

Para a elaboração deste estudo foram realizadas 4 etapas inter-relacionadas, que incluem a coleta, análise e interpretação de dados. O trabalho utilizou uma metodologia estruturada em etapas para analisar o potencial de reúso potável no Brasil.

Etapa 1: Coleta de dados;

Etapa 2: Análise geoespacial;

Etapa 3: Análise das características gerais da ETE;

Etapa 4: Classificação da avaliação de potencial das ETEs selecionadas como alvo do estudo.

A primeira etapa foi a coleta de dados, onde foram identificadas fontes de informações, como a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), o ATLAS Esgotos (2017) e o ATLAS Água (2017). Essas fontes fornecem dados georreferenciados sobre Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), captações de água superficial, vazões, tecnologias de tratamento e população atendida. As informações foram organizadas em uma base de dados categorizada por localização, capacidade de tratamento, tipo de tecnologia das ETEs e captações superficiais e subterrâneas, porém somente foram utilizados os dados de captações superficiais.

Em seguida, na etapa 2 realizou-se uma análise geoespacial, que incluiu o uso de softwares de geoprocessamento, como ArcGIS ou QGIS, para mapear as localizações das ETEs e captações. Esse mapeamento permitiu calcular as distâncias entre as ETEs e as captações mais próximas, considerando as rotas dos corpos hídricos. Contudo, por não se dispor do georreferenciamento exato dos locais de lançamento do esgoto tratado, utilizou-se a localização das ETEs como base para o cálculo das distâncias. Exceções foram aplicadas à região da Baía de Guanabara e a casos de emissários submarinos. Para garantir maior precisão, considerou-se o curso dos corpos hídricos ao calcular essas distâncias.

A análise das características das ETEs foi a última etapa, avaliando as tecnologias de tratamento utilizadas para determinar sua eficiência e adequação ao reúso potável. As vazões das ETEs foram analisadas para verificar se atendem às demandas atuais das populações e se possuem capacidade excedente para reúso de água. Na identificação da viabilidade do reúso potável, foram definidos critérios para selecionar ETEs viáveis para transformação em estações de reúso de água, levando em conta fatores como distâncias geográficas (localizadas até 5km da captação), capacidade de tratamento e qualidade da água. Posteriormente, foi calculado o número de habitantes beneficiados, com base nos dados da população atendida pelas captações e na capacidade das ETEs. Foram feitas estimativas de quantos poderiam ser atendidos pelo reúso potável indireto, considerando a demanda de água potável.

A definição de um raio de até 5 km entre o ponto de lançamento de efluente tratado e a captação para abastecimento público como critério de seleção neste estudo encontra respaldo em experiências internacionais, como o Langford Scheme Recycling (LSR) no Reino Unido. Este projeto, pioneiro no reúso potável indireto na Europa, realiza a derivação de parte do efluente da ETE de Chelmsford para tratamento avançado, com posterior lançamento no Rio Chelmer, a aproximadamente 3 km a montante da captação da ETA de Langford (SANTOS *et al.*, 2022).

Essa distância foi considerada adequada para promover a incorporação e diluição do efluente no corpo hídrico, antes de sua captação para abastecimento, respeitando aspectos de segurança sanitária e operando especialmente em períodos de estiagem (Tortajada, 2020). Assim, a adoção do limite de 5 km neste estudo é tecnicamente fundamentada, abrangendo distâncias semelhantes ou superiores às praticadas em projetos consolidados de reúso potável indireto, permitindo avaliar cenários viáveis de integração entre estações de tratamento de esgoto e pontos de captação de água superficial para abastecimento.

Com base nessas informações foi realizada a etapa 4, que por meio de dois critérios as ETEs foram classificadas. O primeiro critério avaliado foi a sofisticação tecnológica do tratamento, que se refere à capacidade da estação de remover contaminantes como matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes e micropoluentes emergentes, como fármacos e produtos químicos industriais. Tecnologias avançadas oferecem maior segurança sanitária e ambiental, tornando-se mais apropriadas para reúso potável indireto de água.

O segundo critério considerado foi o porte da ETE, baseado na população atendida. Estações de maior porte possuem um impacto mais significativo na gestão hídrica e justificam melhor os investimentos necessários para a implementação de processos avançados de tratamento e polimento do efluente. Com base nesses dois critérios, cada ETE foi classificada em categorias de potencial de reúso potável indireto de água, considerando tanto a tecnologia de tratamento empregada quanto sua abrangência populacional.

A sofisticação tecnológica do tratamento foi categorizada conforme a eficiência esperada na remoção de contaminantes e sua adequação ao reúso potável indireto de água. Foram estabelecidas três faixas de classificação:

- Alta eficiência (★★★) – Tecnologias avançadas que promovem a remoção eficiente de matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes e micropoluentes, como Lodos Ativados com Membranas (MBR) e Lodos Ativados de Tanque Profundo (Deep Shaft). Essas tecnologias garantem um efluente com elevada qualidade final, permitindo sua reutilização com mínimos ajustes adicionais.
- Média eficiência (★★) – Tecnologias convencionais amplamente utilizadas, que apresentam elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos, mas possuem limitações na remoção de micropoluentes. Entre essas tecnologias, destacam-se os sistemas de Lodos Ativados de Aeração Prolongada, NEREDA e Sequencing Batch Reactor (SBR). Embora esses processos atendam às exigências para reúso não potável, podem demandar tratamentos adicionais para se adequarem ao reúso potável indireto.
- Baixa eficiência (★) – Tecnologias que, isoladamente, não são adequadas para reúso potável indireto sem aprimoramentos adicionais, pois apresentam limitações na remoção de micropoluentes e nutrientes. Entre elas estão os sistemas baseados em Reatores Anaeróbios + Filtro Aeróbio + Decantador e Lagoas Aeradas, que exigem complementação com processos terciários para viabilizar o reúso potável.

Além da tecnologia de tratamento, a escala populacional atendida por cada ETE foi considerada um fator determinante na viabilidade do reúso potável indireto. A classificação das ETEs pode ser realizada com base na população atendida, a partir da qual se estima a vazão média do sistema. Esta metodologia permite identificar o porte das ETEs de maneira prática, especialmente quando os dados de projeto hidráulico não estão disponíveis, sendo útil para análises comparativas e diagnósticos regionais.

A ABNT NBR 12209/2011 (ABNT, 2011), ainda que não defina diretamente faixas populacionais, sugere intervalos de porte com base na vazão média de projeto, conforme os parâmetros técnicos adotados para dimensionamento de unidades de tratamento. Com base nessa norma, considera-se:

- Pequeno porte: vazão média inferior a 100 L/s (correspondente a até 50.000 habitantes);
- Médio porte: vazão entre 100 e 250 L/s (de 50.001 a 150.000 habitantes);
- Grande porte: vazão superior a 250 L/s (mais de 150.000 habitantes).

Para este estudo, a vazão média ($Q_{\text{méd}}$) de cada ETE foi estimada com base na população atendida, utilizando a relação de 0,00167 L/s por habitante. Esse fator de conversão considera um consumo médio de 180 L/hab.dia com um coeficiente de retorno de 80%, sendo uma prática comum em estudos de planejamento e engenharia sanitária (SILVA *et al.*, 2023).

A partir dessa estimativa e visto que conforme as características territoriais do Brasil, é complexo definir escalas que podem ser bastante diferentes de região para região, sugeriu-se uma classificação das ETEs em três categorias, sendo atribuído 1 ponto para cada ★:

- Pequeno Porte (★) – ETEs que atendem até 50.000 habitantes, geralmente voltadas a comunidades locais, com impacto mais limitado no reúso potável indireto, mas com potencial para reúso não potável ou local.
- Médio Porte (★★) – ETEs que atendem entre 50.001 e 150.000 habitantes, com potencial razoável de adaptação tecnológica para viabilização do reúso potável indireto, principalmente em cidades de porte intermediário.
- Grande Porte (★★★) – ETEs que atendem mais de 150.000 habitantes, cuja vazão permite considerar soluções em escala regional, com maior viabilidade para projetos estruturantes de reúso potável indireto.

Essa classificação oferece um referencial técnico útil para orientar decisões quanto à priorização de investimentos, adequação de tecnologias e formulação de políticas públicas voltadas à segurança hídrica e ao reúso de água.

A classificação final do potencial de reúso potável indireto foi obtida pela soma das pontuações atribuídas à sofisticação tecnológica e ao porte populacional de cada ETE. Para a definição do porte, adotou-se a estimativa de vazão com base na população atendida, conforme parâmetros da NBR 12209/2011, considerando três categorias: pequeno, médio e grande porte. A escala de avaliação gerada foi a seguinte:

- Alto Potencial (5-6 pontos) → ETEs que reúnem tecnologia avançada e grande porte populacional, sendo adequadas para reúso potável indireto com mínima necessidade de ajustes nos processos de tratamento.
- Potencial Moderado (3-4 pontos) → ETEs de porte médio ou grande com tecnologia intermediária, ou ETEs de médio porte com alta tecnologia, que podem ser adaptadas para reúso potável, desde que complementadas com processos específicos de polimento e remoção de micropoluentes.
- Baixo Potencial (1-2 pontos) → ETEs de pequeno porte ou com tecnologias limitadas, com impacto restrito para reúso potável indireto, exigindo investimentos significativos em modernização para viabilização segura do processo.

A aplicação desses critérios permitiu uma avaliação objetiva do potencial das ETEs analisadas, facilitando a priorização de investimentos para a implementação de projetos de reúso potável indireto, otimizando a gestão dos recursos hídricos e garantindo maior segurança sanitária no aproveitamento da água tratada.

Por fim, os resultados foram discutidos para interpretar os dados e suas implicações na gestão de recursos hídricos no Brasil. Com base nas conclusões, foram sugeridas recomendações para políticas e práticas voltadas à segurança hídrica e à promoção do reúso potável. Essas etapas metodológicas garantem uma análise abrangente e contribuem para o avanço da gestão de recursos hídricos e do saneamento no país.

RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Etapa 1 – Coleta de dados

Com a aplicação da metodologia descrita, foi possível identificar 3.774 ETEs no Brasil em 2017. Contudo, análises mais detalhadas revelaram que muitas dessas ETEs apresentavam limitações, como desativação, operação inativa ou abandonada, ausência de informações operacionais e problemas técnicos, inviabilizando sua inclusão no estudo, resultando em 3523 ETEs ativas.

Adicionalmente, informações cruciais, como o tipo de tratamento e a população atendida, estavam indisponíveis para diversas unidades, limitando a análise proposta, resultando em apenas 120 ETEs que continham tais informações. Desconsiderou-se ainda as ETEs que lançavam no mar, visto que o alvo do estudo eram lançamentos com posterior captação. Estudos recentes destacam desafios similares, enfatizando a necessidade de melhor integração de dados operacionais e demográficos para maximizar o potencial de reúso de águas tratadas no Brasil (CAMELO *et al.*, 2024).

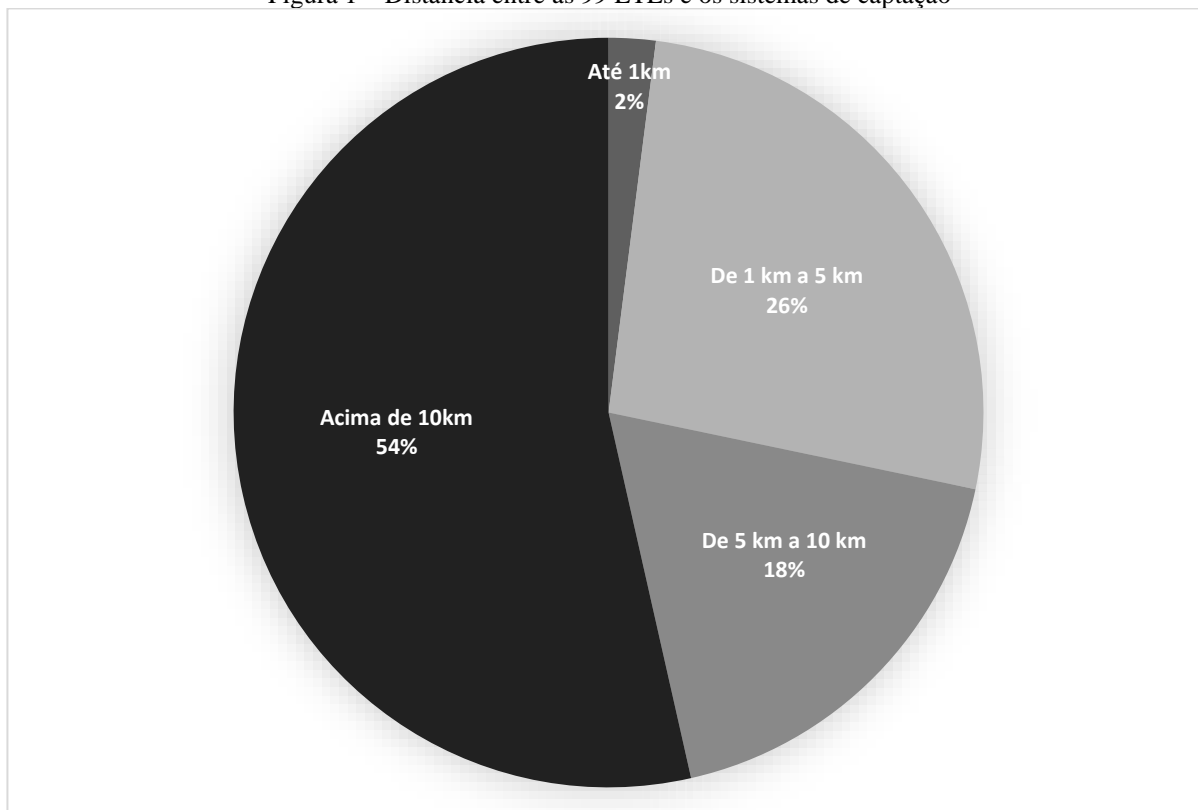
Após a triagem rigorosa dos dados disponíveis, 99 ETEs foram selecionadas para compor o estudo por atenderem aos critérios definidos. No que diz respeito às captações, foram analisados 4.063 pontos de captação de água superficial destinados ao abastecimento público, cuja localização foi usada para determinar a viabilidade geográfica de integração com as ETEs selecionadas, considerando os cursos dos corpos hídricos. Pesquisas recentes reforçam a relevância dessa abordagem para a implementação do reúso potável indireto, ao destacar como a proximidade entre ETEs e captações pode otimizar os custos e os benefícios operacionais (ABOU-SHADY *et al.*, 2023).

Os resultados obtidos fornecem uma base robusta para avaliar a viabilidade do reúso potável indireto no Brasil, apontando oportunidades para melhorar a sustentabilidade hídrica e desafios relacionados à padronização de regulamentos e à eficiência operacional de ETEs. Essa análise reforça a importância de estratégias integradas para aproveitar o potencial das águas residuais tratadas e enfrentar a crescente escassez hídrica (LIMA *et al.*, 2020).

Etapa 2 - Análise geoespacial

As distâncias entre as ETEs e os pontos de captação para abastecimento humano revelam dados importantes no contexto do reúso indireto de água no Brasil. Conforme a Figura 1, essa distribuição aponta que há uma elevada quantidade de estações (28) com até 5 km de distância das fontes de água para consumo humano.

Figura 1 – Distância entre as 99 ETEs e os sistemas de captação



No contexto do reúso potável indireto, a distância entre as ETEs e os pontos de captação de água exercem um papel fundamental na segurança hídrica. Distâncias maiores tendem a favorecer a diluição dos efluentes tratados no corpo hídrico receptor, reduzindo as concentrações de compostos potencialmente prejudiciais e funcionando como uma barreira natural antes da captação, além de favorecer o decaimento bacteriano. No entanto, essa diluição depende não apenas da distância, mas também das vazões do curso d'água e das características específicas dos compostos presentes, considerando seus processos de decaimento físico-químico e biológico (SIDDIQUE, 2021; LIMA *et al.*, 2020).

Por outro lado, a proximidade de algumas ETEs às captações exige maior rigor na qualidade do tratamento do efluente, pois a limitação no tempo de percurso e na capacidade de diluição pode aumentar os riscos de impacto sobre a água captada. Assim, além da eficiência do tratamento aplicado, é essencial avaliar as condições hidrodinâmicas do corpo hídrico receptor para garantir que a qualidade da água atenda aos padrões exigidos para o reúso potável indireto (FERREIRA *et al.*, 2021).

Neste estudo, no entanto, não foram avaliadas as condições hidrodinâmicas nem as vazões dos corpos receptores, o que pode influenciar significativamente a capacidade de diluição e dispersão dos efluentes tratados. Futuros trabalhos podem aprofundar essa análise, incorporando modelos hidrodinâmicos e dados de vazão para uma avaliação mais precisa dos riscos e benefícios do reúso potável indireto.

Essa questão se torna ainda mais relevante no Brasil, onde muitas vezes o esgoto é lançado sem nenhum tratamento ou com tratamento insuficiente. A presença de micropoluentes – como hormônios, medicamentos e outros compostos químicos – que não são removidos de forma eficaz nos processos convencionais de tratamento de esgoto, pode levar à contaminação da água captada, impactando diretamente a qualidade da água destinada ao consumo humano (KOMOLAFE *et al.*, 2021; RAMAN *et al.*, 2023).

Portanto, ao discutir o potencial do reúso potável no Brasil, é essencial considerar tanto a necessidade de ampliar as tecnologias de tratamento para remoção de micropoluentes quanto o monitoramento rigoroso da qualidade da água nos cenários em que as ETEs estão próximas das captações. Além disso, políticas públicas devem priorizar o aumento do tratamento de esgoto para mitigar riscos e possibilitar a implementação segura do reúso potável, fortalecendo a segurança hídrica no país (PAIXÃO *et al.*, 2024).

Quando uma ETE está localizada próxima ao ponto de captação de água para abastecimento público, surge um risco potencial à saúde humana, caso o efluente tratado não atenda aos padrões de qualidade exigidos. Isso ocorre porque os contaminantes residuais, como micropoluentes orgânicos, patógenos e nutrientes, podem não ser completamente removidos nos processos convencionais de tratamento. Se esses compostos alcançarem a captação de água, podem comprometer a potabilidade mesmo após o tratamento em Estações de Tratamento de Água (ETA) (WEILER *et al.*, 2021).

Estudos mostram que micropoluentes como fármacos, hormônios e produtos químicos industriais têm sido detectados em corpos d'água receptores, com efeitos cumulativos na saúde humana e no ecossistema. Esses contaminantes, mesmo em baixas concentrações, podem impactar processos biológicos e aumentar a incidência de doenças crônicas na população (VIDAL *et al.*, 2020).

Diante do cenário apresentado, as ETEs localizadas a até 5 km dos pontos de captação de água para abastecimento humano representam uma prioridade estratégica para avaliação em iniciativas de reúso potável no Brasil. A proximidade dessas estações exige maior atenção, considerando o potencial de diluição e o impacto direto na qualidade da água captada. Por outro lado, essa característica também as torna candidatos ideais para estudos e implementação de soluções tecnológicas mais avançadas, capazes de garantir a remoção de micropoluentes e outros contaminantes.

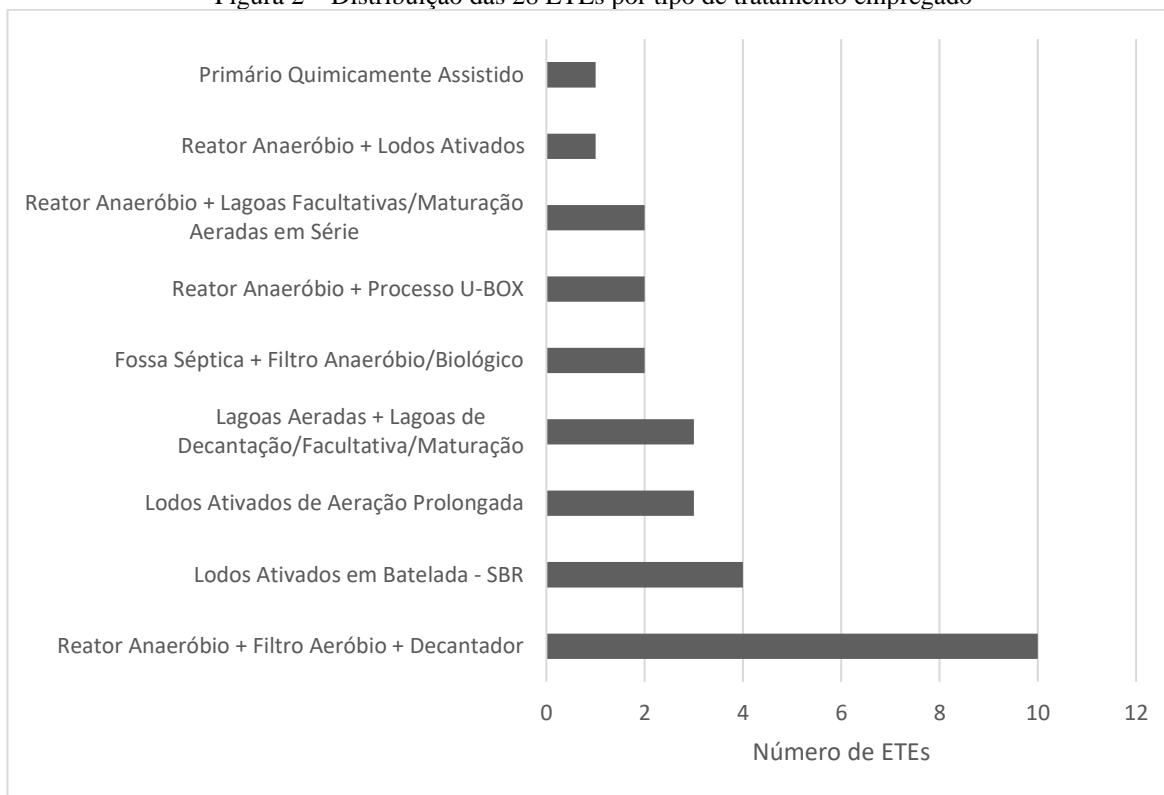
Dessa forma, as 28 ETEs nessa faixa de distância apresentam uma oportunidade para configurar casos iniciais de reúso potável, que podem servir como modelo para replicação em outras regiões. Avaliar e otimizar o tratamento nessas unidades é um passo fundamental para garantir a segurança hídrica e avançar no aproveitamento sustentável desse recurso no país.

Etapa 3 – Análise das características gerais da ETE

A escolha do tratamento de esgoto em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) depende de diversos fatores, como as características do esgoto bruto, a população atendida e a necessidade de remoção de contaminantes, incluindo matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes e micropoluentes emergentes. Neste estudo, foram analisadas 28 ETEs situadas até 5 km de distância da captação, considerando seus processos de tratamento, eficiência na remoção de poluentes e a população atendida por cada unidade.

A análise revelou a predominância de alguns sistemas específicos de tratamento, sendo os mais comuns o Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador, os sistemas de Lodos Ativados, e Lagoas de Estabilização, como apresentado na Figura 2. Cada um desses processos apresenta vantagens e limitações, que variam de acordo com a eficiência na remoção de carga orgânica, sólidos suspensos, nutrientes e micropoluentes.

Figura 2 – Distribuição das 28 ETEs por tipo de tratamento empregado



O sistema Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador foi o mais frequente entre as ETEs analisadas, sendo identificado em 10 das 28 unidades (35,7%). Esse processo combina a degradação biológica anaeróbia inicial, que ocorre em condições de ausência de oxigênio, com uma etapa aeróbia posterior, que utiliza microrganismos para complementar a remoção da matéria orgânica e de sólidos suspensos. O sistema se destaca por sua robustez e eficiência, com remoção média de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) variando entre 75% e 90%, dependendo das condições operacionais (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Ele foi encontrado em unidades como a ETE Itapeccerica (MG), que atende 249.000 habitantes, a ETE Aterrado (RJ), com 99.474 habitantes, e a ETE Gil Portugal (RJ), que atende 75.481 pessoas.

Essas estações demonstram que esse sistema é amplamente adotado em locais com grandes demandas populacionais. No entanto, apesar da elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos, o processo anaeróbio/aeróbio tradicional apresenta limitações na remoção de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, e na degradação de micropoluentes emergentes, estratégias complementares, como processos de adsorção em carvão ativado, ozonização e membranas, podem ser necessárias (MISHRA *et al.*, 2023).

O segundo tratamento mais recorrente entre as ETEs foi o sistema de Lodos Ativados em Batelada - SBR (Sequencing Batch Reactor), identificado em quatro unidades. Esse processo opera em ciclos intermitentes de enchimento, aeração, sedimentação e descarte do efluente tratado, permitindo um controle preciso das reações bioquímicas envolvidas. Além da elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, esse sistema se destaca pela capacidade de promover a remoção simultânea de nitrogênio e fósforo, tornando-se uma alternativa viável para locais que necessitam atender padrões ambientais mais rigorosos (SINGH & SRIVASTAVA, 2011).

As ETEs que utilizam esse processo incluem a ETE Bandeira Branca, que atende 10.111 habitantes, e a ETE Moreiras, com 20.000 habitantes. A eficiência do SBR pode ultrapassar 90% para a remoção de DBO e sólidos suspensos, e quando ajustado para ciclos específicos de desnitrificação, pode alcançar taxas de remoção de nitrogênio superiores a 80% (OLIVEIRA *et al.*, 2012). No entanto, sua aplicação demanda maior controle operacional e consumo energético, além de não ser eficiente na remoção de micropoluentes orgânicos, necessitando de tratamentos terciários adicionais (MISHRA *et al.*, 2023).

Entre os processos de tratamento observados, destaca-se também a tecnologia de Lodos Ativados de Aeração Prolongada, utilizada em três ETEs do grupo. Essa técnica envolve um longo tempo de detenção hidráulica, promovendo uma oxidação biológica mais completa da matéria orgânica (METCALF & EDDY INC, 2014). Um exemplo notável desse sistema é a ETE Mário Araldo Candello, que atende 336.000 habitantes e emprega ainda o sistema MBR (Membrane Bioreactor), uma tecnologia avançada que utiliza membranas de ultrafiltração para reter sólidos finos e contaminantes. Esse processo apresenta uma das maiores eficiências na remoção de matéria orgânica e nutrientes, podendo atingir valores superiores a 95% para DBO e sólidos suspensos (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Além disso, devido à ultrafiltração, o sistema MBR é altamente eficaz na remoção de micropoluentes, reduzindo significativamente a presença de substâncias como antibióticos, hormônios e pesticidas no efluente final. No entanto, sua implementação exige investimentos elevados e alto consumo energético, o que pode ser um fator limitante em determinadas regiões.

As lagoas aeradas, combinadas com lagoas facultativas e de maturação, foram observadas em três ETEs deste grupo e representam uma das tecnologias mais tradicionais no tratamento de esgoto. Esse método se baseia na ação de microrganismos aeróbios e anaeróbios, responsáveis pela degradação da matéria orgânica ao longo do tempo de detenção no sistema (MARA, 2009).

A ETE Hortolândia, que atende 202.523 habitantes, é uma das que adotam esse sistema. Apesar de sua simplicidade e baixo custo operacional, a eficiência desse método pode ser impactada por fatores climáticos, como variações de temperatura e chuvas intensas, que alteram a diluição do esgoto e comprometem a remoção da carga orgânica. A eficiência típica varia entre 70% e 85% para a remoção de DBO, mas a retenção de micropoluentes emergentes é baixa, sendo necessária a combinação com processos terciários para alcançar padrões mais rigorosos de qualidade de efluente (METCALF & EDDY INC, 2014).

Além dos processos principais mencionados, outras tecnologias foram identificadas entre as 28 ETEs, incluindo o uso de fossa séptica com filtro anaeróbio/biológico (em duas unidades), reatores anaeróbios combinados com lagoas facultativas/maturação aeradas em série (em duas unidades) e o processo U-BOX (também em duas unidades), que busca otimizar a remoção de matéria orgânica em sistemas compactos. A ETE Itatiba se destacou pelo uso de um tratamento primário quimicamente assistido (CEPT), seguido por filtração aeróbia e decantação, promovendo alta eficiência na remoção de sólidos e DBO, mas limitada para a remoção de nutrientes e micropoluentes (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

As ETEs analisadas, situadas próximas aos pontos de captação, demonstram um predomínio de sistemas anaeróbios seguidos de etapas aeróbias para polimento do efluente, além da adoção de tecnologias de lodos ativados para locais com maior exigência de remoção de nutrientes. No entanto, a eficiência na remoção de micropoluentes ainda é um desafio, sendo necessário o uso de processos complementares para garantir a qualidade final do efluente antes do lançamento em corpos hídricos.

Etapa 4 - Classificação da avaliação de potencial das ETEs selecionadas como alvo do estudo

A avaliação do potencial das 28 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) para reúso potável indireto de água foi realizada com base em dois critérios principais: a sofisticação tecnológica do tratamento empregado e o porte populacional da estação. A combinação desses fatores permite identificar quais unidades possuem maior viabilidade técnica e operacional para a implementação de projetos de reúso de água, garantindo um efluente de alta qualidade adequado para a recarga de mananciais.

Tabela 1 – Matriz Final de Avaliação do Potencial de Reúso Potável Indireto de água

ETE	Tecnologia (Pontuação)	Porte (Pontuação)	Potencial de Reúso Potável Indireto (Total)
ETE Mário Araldo Candell	Lodos Ativados com Membranas (★★★)	Grande Porte (★★★)	Muito Alto (6 pontos)
ETE Taubaté	Lodos Ativados de Tanque Profundo (★★★)	Grande Porte (★★★)	Muito Alto (6 pontos)
ETE Betim Central	Lodos Ativados de Aeração Prolongada (★★)	Grande Porte (★★★)	Alto (5 pontos)

ETE	Tecnologia (Pontuação)	Porte (Pontuação)	Potencial de Reúso Potável Indireto (Total)
ETE Ribeirão das Neves	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Médio Porte (★★)	Médio (3 pontos)
ETE Jardim Novo	Lodos Ativados NEREDA (★★)	Médio Porte (★★)	Médio (4 pontos)
ETE Itapecerica	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Grande Porte (★★★)	Médio (4 pontos)
ETE Aterrado	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Médio Porte (★★)	Médio (3 pontos)
ETE Central	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados (★★)	Médio Porte (★★)	Médio (4 pontos)
ETE Gil Portugal	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados (★★)	Médio Porte (★★)	Médio (4 pontos)
ETE Piracicamirim	Reator Anaeróbio + Lagoas Aeradas em Série (★)	Médio Porte (★★)	Médio (3 pontos)
ETE Patos de Minas	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Médio Porte (★★)	Médio (3 pontos)
ETE Cohab	Lodos Ativados em Batelada - SBR (★★)	Pequeno Porte (★)	Médio (3 pontos)
ETE Brejinho	Lodos Ativados em Batelada - SBR (★★)	Pequeno Porte (★)	Médio (3 pontos)
ETE Bandeira Branca	Lodos Ativados em Batelada - SBR (★★)	Pequeno Porte (★)	Médio (3 pontos)
ETE Capim Fino	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados - Processo U-BOX (★★)	Pequeno Porte (★)	Médio (3 pontos)
ETE Moreiras	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados - Processo U-BOX (★★)	Pequeno Porte (★)	Médio (3 pontos)
ETE Fazendinha	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados (★★)	Pequeno Porte (★)	Médio (3 pontos)
ETE Hortolândia	Lagoa Aerada + Lagoa Facultativa (★)	Grande Porte (★★★)	Médio (4 pontos)
ETE São Gotardo	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE Araçariгуama	Lagoa Aerada + Filtro Aeróbio (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE Estoril	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados por Batelada (★★)	Pequeno Porte (★)	Médio (3 pontos)
ETE Carinhanha	Reator Anaeróbio + Filtro Horizontal com Macrófitas (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE São Luís do Paraitinga	Lagoa Aerada + Lagoa Facultativa (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE Barras	Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE Jardim Canindés	Fossa Séptica + Filtro Anaeróbio/Biológico (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE BioETE	Filtro Anaeróbio + Decantador (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE Barra do Chápeu	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE Osso de Boi	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)
ETE Venâncio Aires	Reator Anaeróbio + Filtro Aeróbio + Decantador (★)	Pequeno Porte (★)	Baixo (2 pontos)

A identificação das ETEs promissoras para a prática de reúso potável indireto exigiu uma análise combinada da sofisticação tecnológica dos sistemas de tratamento empregados e da abrangência populacional atendida. O reúso potável indireto requer efluentes de alta qualidade, com remoção eficiente de matéria orgânica, nutrientes, sólidos suspensos e micropoluentes emergentes, como fármacos e produtos químicos industriais.

Tecnologias avançadas, como sistemas de lodos ativados com membranas (MBR), processos de aeração prolongada e tratamento terciário, são mais adequadas para garantir efluentes seguros para a recarga de mananciais. Além disso, a viabilidade do reúso em larga escala depende da população atendida pelas ETEs, visto que estações de grande porte permitem otimizar os investimentos necessários para a implementação de processos avançados de polimento do efluente.

Dentre as 28 ETEs analisadas, algumas se destacam como candidatas promissoras para o reúso potável indireto. A ETE Mário Araldo Candello, que atende 336.000 habitantes, emprega um sistema de lodos ativados com membranas (MBR), uma das tecnologias mais eficazes na remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica e micropoluentes. A ultrafiltração por membranas proporciona um efluente de alta qualidade, adequado para processos subsequentes de desinfecção e polimento avançado, tornando essa estação uma das mais adequadas para reúso potável indireto.

A ETE Taubaté, que atende 321.889 habitantes, utiliza um sistema de lodos ativados de tanque profundo (Deep Shaft), uma tecnologia eficiente na remoção de matéria orgânica e nutrientes. Embora não seja um processo diretamente voltado para a remoção de micropoluentes, sua configuração permite integração com tratamentos terciários, tornando-a uma forte candidata para reúso potável indireto.

A ETE Jardim Novo, que atende 100.000 habitantes, adota o sistema NEREDA, uma tecnologia avançada baseada na formação de grânulos aeróbios, que melhora a remoção de matéria orgânica e nutrientes sem a necessidade de recirculação de lodo. Essa abordagem reduz custos operacionais e permite um efluente de qualidade superior, tornando a estação uma opção viável para reúso.

Já a ETE Betim Central, com 203.204 habitantes, e a ETE Ribeirão das Neves, que atende 94.074 habitantes, operam com sistemas de lodos ativados de aeração prolongada, uma das tecnologias convencionais mais eficazes na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos. Essas estações possuem grande abrangência populacional e poderiam ser adaptadas para reúso potável indireto com a implementação de processos terciários adicionais, como filtração por membranas, adsorção em carvão ativado ou ozonização.

Por outro lado, estações que operam exclusivamente com processos anaeróbios seguidos de filtros aeróbios e decantação, como a ETE Itapecerica (249.000 habitantes) e a ETE Atterrado (99.474 habitantes), embora atendam grandes populações, necessitariam de significativas melhorias tecnológicas para que seus efluentes atingissem os padrões de reúso potável indireto. O mesmo se aplica às estações que utilizam lagoas aeradas e lagoas de maturação, como a ETE Hortolândia (202.523 habitantes), que, apesar da simplicidade e robustez operacional, apresentam desafios na remoção de micropoluentes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O potencial do reúso potável indireto no Brasil é significativo, especialmente considerando a distribuição das ETEs e as tecnologias empregadas em seus processos de tratamento. Com base na análise realizada, ficou evidente que estações que utilizam tecnologias avançadas, como lodos ativados, membranas e remoção biológica de nutrientes, associadas a uma alta capacidade populacional, representam as principais candidatas para projetos de reúso. A localização estratégica dessas ETEs em estados como São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná reforça a relevância do tema, visto que essas regiões concentram grande parte da demanda por soluções de gestão hídrica e enfrentam desafios crescentes relacionados à escassez de recursos hídricos e à contaminação dos corpos d'água.

Apesar do potencial identificado, é crucial reconhecer as limitações e desafios para a implementação do reúso potável indireto. A proximidade de algumas ETEs às captações de água destaca a necessidade de monitoramento rigoroso da qualidade do efluente tratado, uma vez que compostos como micropoluentes, frequentemente não removidos pelos tratamentos convencionais, podem comprometer a segurança do reúso de água.

Além disso, o fato de parte significativa do esgoto no Brasil ainda ser lançado sem tratamento ou com tratamento inadequado reforça a urgência de ampliar a cobertura e a eficiência dos sistemas de saneamento, como uma etapa prévia essencial para o avanço do reúso potável no país.

Vale ressaltar que, embora esta análise tenha focado nas tecnologias de tratamento e na população atendida pelas ETEs, não foram avaliadas as vazões de tratamento das estações nem as condições dos corpos receptores. Esses fatores são determinantes para o planejamento de projetos de reúso potável indireto, pois a vazão define a quantidade de água tratada disponível para reúso de água, enquanto as características dos corpos receptores influenciam o potencial de diluição e o risco de contaminação. Estudos futuros que integrem essas variáveis serão fundamentais para uma análise mais robusta e para a definição de estratégias específicas em diferentes contextos regionais.

Em conclusão, o reúso potável indireto de água surge como uma solução promissora para promover a segurança hídrica no Brasil, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas e vulneráveis à escassez de água. No entanto, a viabilização dessa prática exige não apenas o aprimoramento das tecnologias de tratamento nas ETEs, mas também o fortalecimento da regulação e do monitoramento ambiental. Assim, o avanço na implementação do reúso potável indireto de água dependerá de uma abordagem integrada, que leve em conta as especificidades locais, invista em infraestrutura, priorize a saúde pública e garanta a qualidade da água para as gerações futuras.

AGRADECIMENTOS

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e à Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-SHADY, Ahmed; SIDDIQUE, Muhammad Saboor; YU, Wenzheng. A critical review of recent progress in global water reuse during 2019–2021 and perspectives to overcome future water crisis. *Environments*, v. 10, n. 9, 2023. DOI: 10.3390/environments10090159.

AKPAN, Victor Elijah; OMOLE, David O.; BASSEY, Daniel. Assessing the public perceptions of treated wastewater reuse: opportunities and implications for urban communities in developing countries. *Heliyon*, v. 6, n. 10, October 2020. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05246.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SINISA. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/sinisa-1>. 2023.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planejamento-das-aguas/atlas-esgotos>.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas Brasil: abastecimento urbano de água. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/planejamento-das-aguas/atlas-brasil-abastecimento-urbano-de-agua>.

CAMELO, Luana; DE BRITO, Daniel Oliveira; DE ALMEIDA, Maria Cristina. Performance evaluation of wastewater treatment plants in Southern Brazil. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 29, 2024. DOI: 10.1590/S1413-415220230060.

DOW, Cory; AHMAD, Sajjad; STAVE, Krystyna; GERRITY, Daniel. Evaluating the sustainability of indirect potable reuse and direct potable reuse: a southern Nevada case study. *AWWA Water Science*, July 2019. DOI: 10.1002/aws2.1153.

FERREIRA, Arthur Humberto Rocha; FERREIRA, Danieli Mara; FERNANDES, Cristovão Vicente Scapulatempo. Modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água como ferramenta para avaliação de enquadramento de corpos d'água. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 18, n. 1, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/610>.

FUKASAWA, Bruno Nogueira; MIERZWA, José Carlos. Identification of water reuse potential in metropolitan regions using the analytic hierarchy process. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 8, December 2020. DOI: 10.1016/j.indic.2020.100064.

GERRITY, Daniel; PECSON, Brian; TRUSSELL, R. Shane; TRUSSELL, Rhodes. Potable reuse treatment trains throughout the world. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, v. 62, n. 6, p. 321-338, August 2013. DOI: 10.2166/aqua.2013.041.

KAISER, Francieli Aparecida Cezário et al. Environmental and socioeconomic aspects related to the acceptance of direct potable reuse in a metropolitan city in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 466, August 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142897.

KELLER, Arturo A.; SU, Yiming; JASSBY, David. Direct potable reuse: Are we ready? A review of technological, economic, and environmental considerations. *ACS ES&T Engineering*, September 2021. DOI: 10.1021/acsestengg.1c00258.

KOMOLAFE, Oladapo et al. Occurrence and removal of micropollutants in full-scale aerobic, anaerobic and facultative wastewater treatment plants in Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 287, June 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112286.

LAHNSTEINER, J.; VAN RENSBURG, P.; ESTERHUIZEN, J. Direct potable reuse – a feasible water management option. *Journal of Water Reuse and Desalination*, v. 8, n. 1, p. 14–28, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wrd.2017.172>.

LIMA, Maíra Araújo et al. Water reuse potential for irrigation in Brazilian hydrographic regions. *Water Science & Technology Water Supply*, v. 21, n. 4, October 2020. DOI: 10.2166/ws.2020.280.

MARA, D. D. Waste stabilization ponds: past, present and future. *Desalination*, v. 248, n. 1-3, p. 10-16, 2009.

METCALF & EDDY INC. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MISHRA, Saurabh; SINGH, Virender; ORMECI, Banu; HUSSAIN, Abid; CHENG, Liu; VENKITESHWARAN, Kaushik. Anaerobic-aerobic treatment of wastewater and leachate: A review of process integration, system design, performance and associated energy revenue. *Journal of Environmental Management*, v. 327, p. 116898, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116898>.

OLIVEIRA, S. C.; SANTOS, M. M.; SANTOS, A. B. Post-treatment of anaerobic effluents from domestic sewage treatment using different filter media. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 10, p. 2207-2213, 2012.

PAIXÃO, Mickaela Midon da; PEREIRA, Renata de Oliveira; SANTOS, Ana Silvia. Micropollutants in potable water reuse: Review on guiding documents and operating plants around the world. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 29, 2024. DOI: 10.1590/S1413-415220240060.

RAMAN, Nandini Vasantha et al. Monitoring contaminants of emerging concern in aquatic systems through the lens of citizen science. *Science of the Total Environment*, v. 874, May 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162527.

SANTOS, Ana Silvia Pereira et al. Progress on legal and practical aspects on water reuse with emphasis on drinking water – an overview. *Water Supply*, [s.l.], v. 22, n. 3, p. 3000–3014, 1 mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2021.412>.

SIDDIQUE, Iqtiaar Md. Sustainable water management in urban areas: Integrating innovative technologies and practices to address water scarcity and pollution. *The Pharmaceutical and Chemical Journal*, v. 8, n. 1, p. 172–178, February 2021. DOI: 10.5281/zenodo.11523688.

SILVA, Francisco das Chagas Silva; MEDEIROS, Tamires Santos; BRAGA, Gabriel Silva. Estudo de concepção do sistema de tratamento de esgotos sanitários da sede municipal de Santa Maria do Salto - MG. *Revista Multidisciplinar de Meio Ambiente*, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2023. DOI: 10.61164/rmmn.v9i1.2848.

SINGH, M. S.; SRIVASTAVA, R. K. Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: a review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v. 6, n. 1, p. 3-13, 2011.

Tortajada, C. 2020 Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation: sustainable development goals. *NPJ Clean Water* 3 (1), 1–6.

VIDAL, Carla B. *et al.* Multiresidue determination of endocrine disrupting compounds in sewage treatment plants (SPE-HPLC-DAD). *J. Braz. Chem. Soc.*, v. 31, n. 12, Dec 2020. DOI: 10.21577/0103-5053.20200127.

WEILER, Elenice B. *et al.* Integrated environmental management and planning based on soil erosion susceptibility scenarios. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, v. 93, n. 4, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120191120.

WIEMANN, M.; SCHOLZ, M.; BERGER, U.; *et al.* Removal of micropollutants and cyanobacterial toxins from treated wastewater by biofiltration for artificial groundwater recharge. *Water Research*, v. 45, n. 16, p. 5164-5176, 2011.