UNIVERSIDADE DE UBERABA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL

GIOVANNI ANDREA MOLINERO

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO REÚSO DE ÁGUA DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM ATIVIDADES URBANAS NÃO POTÁVEIS NO MUNICÍPIO DE UBERABA – MG

UBERABA-MG
2026

GIOVANNI ANDREA MOLINERO

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO REÚSO DE ÁGUA DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM ATIVIDADES URBANAS NÃO POTÁVEIS NO MUNICÍPIO DE UBERABA – MG

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA-MG
2026

Catalogação elaborada pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

M734e

Molinero, Giovanni Andrea.
Estudo da viabilidade técnica do reúso de água de estação de tratamento de esgoto em atividades urbanas não potáveis no município de Uberaba-MG / Giovanni Andrea Molinero. – Uberaba (MG), 2026.
56 f. : il., color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

1. Água – Reúso. 2. Desenvolvimento de recursos hídricos. 3. Água – Purificação – Cloração. 4. Sustentabilidade. I. Finzer, José Roberto Delalibera. II. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Mestrado Profissional. III. Título.

CDD 628.1

Tatiane da Silva Viana – Bibliotecária – CRB-6/3171

GIOVANNI ANDRÉA MOLINERO

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO REÚSO DE ÁGUA DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM ATIVIDADES URBANAS NÃO POTÁVEIS NO MUNICÍPIO DE UBERABA – MG

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 20/08/2026

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer – Orientador(a)
Universidade de Uberaba

Prof(a). Dr(a). Adriano Dawison de Lima
Universidade de Uberaba

Prof(a). Dr(a). Marcelo Bacci da Silva
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

DEDICATÓRIA

A Deus, pela força, sabedoria e por sustentar meus passos nos momentos de incerteza. E a minha família, pelo suporte incansável, paciência e renúncias que tornaram a realização deste mestrado possível. Esta conquista é fruto da fé e do amor de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me concedido saúde, sabedoria e resiliência para superar os momentos de maior cansaço e incerteza ao longo desta jornada acadêmica.

À minha família, pelo apoio incondicional, pela paciência com as minhas ausências e por serem o meu porto seguro. Vocês abdicaram de momentos ao meu lado para que eu pudesse focar neste sonho, e esta conquista é genuinamente nossa.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer, pela paciência, pelas críticas construtivas e pela condução brilhante deste trabalho. Sua generosidade em compartilhar conhecimento foi fundamental para o meu aprimoramento científico, técnico e profissional.

Aos docentes do Mestrado em Engenharia Química da Universidade de Uberaba, pelos ensinamentos transmitidos, pelo conhecimento compartilhado e pela troca de experiências que ampliaram meus horizontes acadêmicos.

Aos meus colegas de mestrado e amigos, pelo apoio mútuo, pelas trocas de ideias, pelos momentos de descontração e pelo companheirismo nos momentos mais intensos da nossa jornada.

À Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas - CODAU, pelo fornecimento de dados essenciais, pelo acesso às Estações de Tratamento de Esgoto e pelo suporte institucional. Agradeço, à Gerência de Esgotamento Sanitário, em especial aos servidores Letícia Cristina de Sousa Dias e Luís Felipe da Cruz Souza, pela receptividade, pelo apoio técnico e pela imensa presteza no compartilhamento de informações fundamentais para a viabilização deste estudo.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, torceram por mim e contribuíram para a realização deste objetivo, o meu muito obrigado.

Aos órgãos de fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação (Processos: MPR-01119-16; APQ-01203-23).

RESUMO

Este estudo investigou a viabilidade técnica e operacional da implantação de um sistema de reúso de água para fins urbanos não potáveis no município de Uberaba (MG), utilizando como unidade geradora o efluente tratado da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Francisco Velludo. Frente ao cenário atual de mudanças climáticas e aos recorrentes períodos de estiagem severa que reduzem criticamente a vazão do rio Uberaba — principal manancial de abastecimento público local —, a pesquisa buscou propor uma alternativa estratégica fundamentada nos princípios da economia circular e da gestão sustentável dos recursos hídricos. O objetivo principal consistiu em caracterizar a disponibilidade volumétrica e qualitativa da estação, além de estimar a demanda potencial para atividades de manutenção infraestrutural e higiene pública realizadas pela Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas (CODAU), com o intuito de substituir o uso de água nobre tratada por Água de Reúso Não Potável (ARNP). A metodologia adotada compreendeu a análise sistemática dos dados operacionais de vazão e dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da ETE ao longo do ano de 2025. Adicionalmente, quantificou-se a demanda municipal por meio do mapeamento de área das feiras livres semanais e do levantamento de ordens de serviço (OS) de caminhões de hidrojateamento para a desobstrução de redes coletoras. A demanda anual elegível para lavagem de vias e hidrojateamento totalizou 61.512,85 m³, o que representa uma economia direta de água potável. No entanto, a alta concentração média de Escherichia coli (1,02x10^6 NMP/100 mL) restringe o efluente bruto apenas às modalidades agrossilvipastoril e ambiental limitadas, conforme os critérios da Deliberação Normativa CERH-MG nº 65/2020. Para que seja possível utilizar o efluente tratado da ETE Francisco Velludo em outras modalidades de água de reúso, é necessária a redução do parâmetro de E.Coli e, por isso, foram conduzidos ensaios laboratoriais com substrato cromogênico e dosagens variadas de hipoclorito de sódio a 12% para avaliar a eficiência de inativação microbiológica e a manutenção de cloro residual livre. Os testes de desinfecção, removeram mais de 99,98% da carga bacteriana, mas falharam em garantir o residual de cloro exigido para o transporte seguro. Conclui-se que a ETE Francisco Velludo apresenta viabilidade técnica para o fornecimento de Água de Reúso Não Potável, desde que incorporada uma etapa complementar de desinfecção por cloração. Ao integrar a caracterização da disponibilidade hídrica, a quantificação da demanda urbana e a validação experimental de uma alternativa para adequação

microbiológica do efluente, o estudo fornece uma base técnico-científica para a implantação de programas de reúso em Uberaba e em outros municípios com desafios semelhantes de segurança hídrica, contribuindo para a conservação da água potável e para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Reúso de água. Efluente sanitário. Desinfecção por cloração. Gestão hídrica sustentável.

ABSTRACT

This study investigated the technical and operational feasibility of implementing a water reuse system for non-potable urban purposes in the municipality of Uberaba, Minas Gerais (MG), using the treated effluent from the Francisco Velludo Wastewater Treatment Plant (WWTP) as the generating unit. Faced with the current scenario of climate change and recurrent periods of severe drought that critically reduce the flow of the Uberaba River — the primary local source for public water supply —, this research sought to propose a strategic alternative based on the principles of circular economy and sustainable water resources management. The main objective consisted of characterizing the volumetric and qualitative availability of the plant, in addition to estimating the potential demand for infrastructural maintenance and public hygiene activities carried out by the Operational Company for Development, Sanitation, and Urban Actions (CODAU), aiming to replace the use of treated drinking water with Non-Potable Reuse Water (NPRW). The adopted methodology comprised the systematic analysis of operational flow data and the physicochemical and microbiological parameters of the WWTP throughout the year 2025. Additionally, municipal demand was quantified by mapping the area of the weekly open-air markets and surveying service orders for hydro-jetting trucks used in the clearing of sewage collection networks. The eligible annual demand for street washing and hydro-jetting totaled 61,512.85 m³, representing a direct saving of drinking water. However, the high average concentration of Escherichia coli (1.02×10^6 MPN/100 mL) restricts the raw treated effluent solely to limited agrosilvopastoril and limited environmental modalities, according to the criteria of the Normative Deliberation CERH-MG No. 65/2020. To enable the utilization of the treated effluent from the Francisco Velludo WWTP in other water reuse modalities, it is necessary to reduce the E. coli parameter; therefore, laboratory assays were conducted using a chromogenic substrate and varying dosages of 12% sodium hypochlorite to evaluate microbiological inactivation efficiency and the maintenance of free residual chlorine. In the disinfection tests, removed more than 99.98% of the bacterial load but failed to guarantee the residual chlorine required for safe transport. It is concluded that the Francisco Velludo WWTP presents technical feasibility for the supply of urban reuse water, provided that a complementary chlorination disinfection stage is incorporated,

thereby promoting drinking water conservation and mitigating conflicts over water resource allocation in the municipality.

Keywords: Water reuse. Sewage effluent. Chlorination disinfection. Sustainable water management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Coliformes usa sua enzima β-galactosidase de metabolizar ONPG e muda de incolor para amarelo.	**19**
Figura 2	*E. coli* usa enzima β-glicuronídeo para metabolizar MUG e criar fluorescência.	**20**
Figura 3	Fluxograma metodológico	**21**
Figura 4	Vista ETE Francisco Velludo	**28**
Figura 5	Vazões mensais ETE Francisco Velludo em 2025	**29**
Figura 6	Análise microbiológica de coliformes	**44**
Figura 7	Correlação de cloro com volume hipoclorito utilizado	**46**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Modalidades de uso e suas restrições	**11**
Tabela 2	Padrões de qualidade da água para reúso quanto ao tipo de uso em Minas Gerais	**12**
Tabela 3	Parâmetros de qualidade de efluentes sanitários tratados para diferentes tipos de reuso, conforme Prosab.	**14**
Tabela 4	Vantagens do reúso da água e suas dimensões	**15**
Tabela 5	Dados do efluente tratado ETE Francisco Velludo 2025	**30**
Tabela 6	Enquadramento do efluente tratado nas modalidades de reúso com base na concentração de *E. coli* (2025)	**35**
Tabela 7	Feiras de Uberaba - Minas Gerais	**36**
Tabela 8	Quantidade de ordens de serviço de caminhões de hidrojateamento do ano de 2025.	**38**
Tabela 9	Cálculo da demanda de água para limpeza das feiras mensal	**40**
Tabela 10	Volume de água gasto por atividade	**42**
Tabela 11	Dimensões tanque de contato	**43**
Tabela 12	Resultados da análise microbiológica.	**45**
Tabela 13	Testes de cloro residual livre para 1 litro de efluente	**46**

FICHA DE NOTAÇÃO

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ARNP	Água de Reúso Não Potável
CF	Coliformes
CODAU	Companhia Operacional de Desenvolvimento, Saneamento e Ações Urbanas
CPEs	Contaminantes de Preocupação Emergente
CT	Coliformes totais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DST	*Difined Substrate Techonology*
E.coli	*Escherichia coli*
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
HOCl	Ácido Hipocloroso
L	Litro
LAF	Lagoas Aeradas Facultativas
LAMC	Lagoas Aeradas de Mistura Completa
MF	Microfiltração

MG	Minas Gerais
mL	Mililitro
MS	Ministério da Saúde
MUG	4-metilumbeliferil-β-D-glucuronídeo
N	Nitrogênio
ND	Nada
NMP	Número Mais Provável
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONPG	Orto-nitrofenil-β-D-galactopiranosídeo
OR	Osmose Reversa
OS	Ordem de Serviço
P	Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
POAS	Processos Oxidativos Avançados
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
PSM	Processos de Separação por Membranas
TMBR	Biorreator de Membrana Terciário
UASB	*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*
UF	Ultrafiltração

UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
UV	Ultravioleta
ZLD	*Zero Liquid Discharge*

Sumário

1 INTRODUÇÃO 1
2 OBJETIVOS 4
2.1 Objetivo geral 4
2.2 Objetivos específicos 4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
3.1 Introdução 5
3.2 Legislação do reúso da água em Minas Gerais 9
3.3 Modalidades do reúso de água 10
3.3.1 Reúso rural e agrícola 10
3.3.2 Reúso industrial (sistema de circuito aberto e fechado) 13
3.3.3 Reúso urbano não potável 13
3.4 Barreiras tecnológicas e processos de tratamento 13
3.4.1 Processos de separação por membranas (psm) 13
3.4.2 Processos oxidativos avançados (poas) 13
3.5 Vantagens sustentáveis e o nexo água-energia 15
3.5.1 Dimensão Ambiental: Mitigação da Eutrofização e Vazão Ecológica 15
3.5.2 Dimensão Econômica: Resiliência Financeira e Valorização do Ativo Hídrico 16
3.5.3 Dimensão Social: Justiça Hídrica e Saúde Pública 16
3.6 Projeto Aquapolo 16
3.7 Desinfecção de águas de reúso 18
4 METODOLOGIA PROPOSTA 21
4.1 Caracterização da infraestrutura de saneamento e oferta 21
4.2 ETE Francisco Velludo 22
4.3 Identificação e espacialização da demanda 23
4.4 Estimativa do Volume de Água Substituível 24
4.4.1 Cálculo da demanda de higiene urbana 24
4.4.2 Estimativa dos volumes de água para fins não potáveis 25
A estimativa total da demanda de água para fins não potáveis foi obtida a partir da soma das parcelas calculadas: 25
4.5 Análise de Impacto e Balanço Hídrico 26
4.5.1 Indicador de economia de água potável 26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 27
5.1 Área de feiras livres no município de Uberaba 34
5.2 Quantificação de ordens de serviços do município de Uberaba 37

5.3 Estimativa do volume de água passível de substituição no município de Uberaba 39

5.4 Levantamento de demanda hídrica para higiene urbana no município de Uberaba 39

5.5 Levantamento da demanda hídrica utilizada na manutenção de redes coletoras no município de Uberaba 41

5.6 Estimativa total da demanda hídrica no município de Uberaba 41

5.7 Economia anual ao usar água de reúso nas atividades registradas 42

5.8 Dimensionamento do tanque de cloração 42

5.9 Testes laboratoriais de dosagem de cloro para redução do teor de E.Coli 43

6 CONCLUSÃO 48

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são fenômenos que atualmente assolam o mundo todo e desencadeiam sérios problemas ambientais, políticos, sociais e econômicos, impactando diretamente as inter-relações humanas e as relações com o meio ambiente. Dentre os diversos aspectos observados, um fenômeno facilmente reconhecido é a alteração no regime hídrico. Os regimes de chuvas e as variações de temperatura vêm impactando diretamente o comportamento de estados e países, trazendo discussões cada vez mais relevantes sobre a temática em âmbito mundial.

Segundo Freitas, 2011, embora o Brasil ocupe uma posição privilegiada, detendo cerca de 13,7% da água doce disponível no planeta, o país enfrenta o paradoxo de ter 80% de sua água superficial concentrada na Região Amazônica, enquanto regiões com alta densidade demográfica e demanda sofrem com a disponibilidade limitada enfrentando contradições severas onde a escassez se manifesta de forma crítica.

A problemática da diminuição da quantidade e qualidade da água superficial em diversas regiões brasileiras é impulsionada por uma combinação de fatores críticos. As mudanças climáticas e o aquecimento global têm alterado significativamente os ciclos hidrológicos, resultando em perfis pluviométricos alterados. Isso se manifesta em eventos extremos, como secas prolongadas na região Sul e crises de abastecimento severas no Sudeste, como a observada entre os anos de 2013 e 2015 (TARGA e BATISTA, 2015).

Além disso, o impacto também pode ser observado diretamente em relação à deterioração da qualidade do recurso natural. A escassez é agravada pela redução da qualidade da água disponível devido ao manejo deficiente do solo, poluição por contaminantes químicos diversos e o descarte inadequado de efluentes.

Considerando este contexto, é evidente que existe a necessidade de propor novas ferramentas de gestão dos recursos hídricos para reverter o atual cenário de degradação ambiental e desperdício, garantindo um modelo de desenvolvimento que seja verdadeiramente sustentável.

Para enfrentar esses desafios, a gestão deve ser pautada por ferramentas que alinhem o progresso tecnológico à sustentabilidade e a preservação para as gerações futuras, conectando-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015).

A transição para uma gestão mais sustentável exige que os recursos hídricos sejam tratados como prioridade estratégica, integrando políticas de saneamento, educação ambiental e inovação tecnológica. Somente através da implementação efetiva de novos instrumentos de gestão será possível garantir a disponibilidade de água e a saúde dos ecossistemas para o futuro (AZEVEDO, FILHO e ALBUQUERQUE, 2022).

Nesse cenário, o reúso de água destaca-se como uma ferramenta estratégica adicional que permite a redução do consumo de água potável e serve como um recurso hídrico suplementar. Lavrador Filho (1987) descreve que a água de reúso é o "aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original".

A PROLAGOS (2015) cita que a água de reúso é o produto de uma técnica de refinamento do esgoto tratado e polido. Barros et al. (2015) definem que água de reúso é a reutilização de águas provenientes de efluentes tratados.

Uma das principais vantagens do reúso é o alívio da demanda e a preservação dos mananciais de água doce, contribuindo significativamente para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, especialmente em períodos de escassez (BREGA FILHO e MANCUSO, 2003).

Adicionalmente, a prática promove a reciclagem de nutrientes, reduz o lançamento de efluentes em corpos receptores e diminui o consumo de energia associado ao tratamento e distribuição de água potável (FLORENCIO, BASTOS e AISSE, 2006; ASANO, 2002).

Nesse cenário, a realidade nacional de escassez e conflitos pelo uso da água se materializa de forma concreta no município de Uberaba, inserido na bacia hidrográfica do rio Uberaba que é uma sub-bacia integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, na região do Triângulo Mineiro/MG.

Diante dessa problemática, desde o ano de 2002, de modo a minimizar os impactos e garantir o abastecimento do município, uma das saídas emergenciais da administração pública foi a transposição de parte da água do rio Claro, direto no Córrego Saudade um dos afluentes do alto curso do rio Uberaba (UBERABA, 2008).

Apesar desse cenário, o município ainda não dispõe de estudos consolidados sobre a viabilidade do reúso de águas residuárias, nem de legislação específica sobre o tema. Embora existam diretrizes federais, como a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007 (Lei

de Saneamento Básico), com as atualizações estruturais da Lei nº 14.026/2020 e as recentes disposições da Lei nº 14.546/2023, e ainda as experiências municipais consolidadas, como a regulamentação adotada em Campinas (Resolução Conjunta nº 09/2014), a lacuna técnica e normativa local reforça a necessidade de pesquisas que subsidiem a implementação do reúso como instrumento estratégico de gestão hídrica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar o potencial do reúso de água oriunda da ETE Francisco Velludo em atividades urbanas não potáveis no município de Uberaba-MG.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar a disponibilidade de efluente tratado produzida pela Estação de Tratamento de Esgoto Francisco Velludo;
- Estimar a demanda de água para atividades urbanas não potáveis no município de Uberaba-MG;
- Caracterizar a qualidade físico-química e microbiológica do efluente tratado quanto à sua adequação para reúso urbano não potável;
- Avaliar a conformidade do efluente tratado em relação aos critérios e padrões técnicos aplicáveis ao reúso urbano não potável;
- Avaliar a eficiência da desinfecção complementar por cloração na redução da concentração de *E. coli* e na obtenção de cloro residual compatível com os requisitos sanitários;
- Analisar a viabilidade técnica da utilização do efluente tratado em atividades urbanas não potáveis no município de Uberaba-MG.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Segundo Gonçalves (2016) a água é um dos recursos essenciais para a vida humana, podendo ser utilizada para muitas coisas, sendo no dia a dia simples às mais complexas das necessidades. “Do volume total de água na terra, 97% é salgada que corresponde aos oceanos, enquanto os 3% restantes são de água doce. Desta pequena parcela a maior parte (2,3%) encontra-se congelada nos pólos ou em aquíferos subterrâneos (0,6%), restando apenas cerca de 0,1% distribuídos em lagos e rios.” (VASCONCELOS, 2015).

Atualmente estima-se que 2,2 bilhões de pessoas no mundo não dispõem de serviços seguros de água potável. Em outras palavras, de acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS) e do Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF), 1 em cada 3 habitantes do planeta não tem acesso à água. Além disso, 4,2 bilhões de pessoas não têm serviços de esgotos sanitários adequados e 3 bilhões de pessoas sequer possuem instalações básicas para a higienização das mãos (UNITED NATIONS CHILDREN’S FUND; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2019).

Quando olhado de uma forma global, entende-se que a espécie humana deve utilizar os recursos naturais de forma a não alterar as atuais condições de equilíbrio planetário, o qual depende fundamentalmente do equilíbrio climático e da biodiversidade existente (SACHS, 2007).

Essas alterações ambientais podem desencadear mudanças nos regimes de chuvas, a que se atribui uma frequência maior de eventos extremos como inundações e secas, com efeitos na oferta de água (MARENGO et al., 2015). Ressalta-se que a água se apresenta como um fator fundamental tanto para a manutenção dos ecossistemas naturais como também para os ecossistemas produtivos, identificados como produtores de alimentos por meio de atividades humanas. Qualquer modificação na oferta natural de água em decorrência de mudanças climáticas poderá trazer profundas oscilações tanto no equilíbrio dinâmico dos ecossistemas naturais como na produtividade agrícola, com sérias consequências econômicas e sociais (SALATI, 2015).

A problemática da escassez hídrica no Brasil é um tema de complexidade crescente, que envolve desde as diversidades geográficas naturais até as falhas sistêmicas de governança e os impactos das mudanças climáticas.

Brasil destaca-se no cenário mundial pela grande descarga de água doce dos seus rios, cuja produção hídrica, 177.900 m³/s, representa 53% da produção de água doce do continente sulamericano (334 mil m³/s) e 12% do total mundial (1.488 milhões de m³/s) (REBOLÇAS, 2015).

O Brasil detém entre 12% e 16% da água doce do mundo, o que gera a falsa percepção de que esse recurso é infinito. No entanto, essa riqueza mascara uma distribuição desigual, onde a abundância se concentra na Bacia Amazônica, enquanto a maior parte da população e da atividade econômica reside em regiões que enfrentam estresse hídrico severo.

Para alguns, esses valores caracterizam a nossa abundância de água doce, o que tem servido de suporte à cultura do desperdício da água disponível, à não realização dos investimentos necessários para o seu uso e proteção mais eficientes, e à sua pequena valorização econômica, isto é, água tem sido considerada um bem livre de uso comum (REBOLÇAS, 2015).

Para fins de gestão de recursos hídricos, o Brasil encontra-se subdividido em 12 bacias hidrográficas principais. As características climáticas, ecológicas e econômicas dessas bacias são bastante diferenciadas: as bacias da Região Norte têm água em abundância e necessitam de cuidadosa preservação ambiental; às do Nordeste são deficitárias, requerendo investimentos consideráveis em programas de conservação e obras para aumento de vazões. Nas bacias do Sudeste, a degradação ambiental, tanto no ambiente urbano como no rural requer medidas de controle de poluição pontual e difusa, as quais envolvem grandes investimentos de capital. No Centro-Oeste do País, a nova fronteira agrícola, o problema é a necessidade de grandes volumes para irrigação (BRAGA et al., 2015).

Nota-se que, embora o autor não detalhe a Região Sul no trecho supracitado, esta compartilha com parte do Sudeste e Centro-Oeste o desafio de equilibrar a alta demanda produtiva para a irrigação (especialmente na rizicultura) com a preservação da qualidade da água

Em termos gerais, há uma grande oferta hídrica no Brasil. Por outro lado, também possui uma diferença significativa entre suas regiões hidrográficas no que diz respeito à oferta e à demanda de água. Nesse contexto, enquanto bacias localizadas em áreas com uma combinação de baixa disponibilidade e grande utilização dos recursos hídricos,

podem enfrentar situações de escassez, outras se encontram em situação confortável, com o recurso em abundância (ANA, 2017).

O Brasil enfrenta preocupações relacionadas ao abastecimento e à demanda por água, uma vez que a população está majoritariamente concentrada em uma região geográfica onde a disponibilidade de recursos hídricos é desfavorável (Moreira, et. al.,2021). O alto grau de urbanização tem contribuído para a deterioração da qualidade das fontes de água doce (especialmente aquelas que atravessam grandes centros urbanos), visto que, no Brasil, apenas 49,1% do esgoto passa por algum tipo de tratamento, sendo essa taxa de 55,5% na Região Sudeste (SNIS, 2019).

As secas têm se tornado mais longas, frequentes e severas nas regiões brasileiras nos últimos anos, associadas às mudanças climáticas globais. Em 2019, cerca de 22 milhões de brasileiros foram afetados, e estima-se que 60,9 milhões de pessoas residam em cidades que enfrentam escassez hídrica (ANA, 2017). Além disso, prevê-se que, até 2030, o consumo de água no Brasil aumente 24% em comparação a 2019, impulsionado pelo processo de urbanização e pela expansão econômica (IANAS, 2019).

Em decorrência destes fatores, o Brasil vem passando por oscilações nos períodos de chuva, o que reverte fundamentalmente na reposição das bacias hidrográficas e na distribuição de água para a população, as medidas de mitigação devem ir muito além de ações das concessionárias de abastecimento; é fundamental o envolvimento de uma ampla rede de atores governamentais e não governamentais para garantir a segurança da população, incluindo o direito ao abastecimento de água para consumo, à saúde e ao emprego (ANA, 2017).

A crise da água no Brasil não se refere aos recursos, mas, sobretudo, a sua má utilização. Por causa da dimensão do território, da posição geográfica e das características topológicas, o Brasil possui cinco tipos de climas zonais baseados em medidas de chuva e temperatura: clima equatorial; clima tropical zona equatorial; clima tropical Nordeste oriental; clima tropical Brasil Central; e clima temperado (subtropical) (IBGE, 2002). Segundo Rebouças (2002), o território brasileiro possui abundante pluviometria, situando-se entre 1.000 e 3.000 milímetros por ano. Isto é o suficiente para que o país possua rios caudalosos e perenes, com exceção do semiárido nordestino, onde existem diversos rios temporários, representando 12% do território nacional com precipitação média anual igual ou inferior a 800 milímetros (SUDENE, 2017).

De acordo com Mendonça e Santos (2006), o que se observa no Brasil com relação aos recursos hídricos é uma “cultura do desperdício” transmutada para uma “cultura do compartilhamento”. Isto quer dizer que o Estado e todas as esferas do governo, com a sociedade, estão intimamente ligados no desafio da gestão dos recursos hídricos e sua discussão. No que se refere aos marcos legais, o Código de Águas é uma legislação federal existente no Brasil desde 1934 e visa principalmente à proteção da qualidade das águas brasileiras (BRASIL, 1934). É mundialmente considerado uma das mais completas leis que tratam da água (DARONCO, 2013).

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, no artigo 225, traz o meio ambiente como um direito fundamental à vida sadia e equilibrada, atribuindo a todos o dever de proteção da natureza (CONSTITUIÇÃO FEDERAL, 1988).

A exploração desenfreada dos corpos d’água, o desmatamento, a contaminação por agrotóxicos, esgotos, resíduos sólidos e a exploração indiscriminada dos recursos hídricos têm levado ao ressecamento de rios, lagos, açudes e aquíferos em todo o mundo. Grande parcela da água extraída para o uso humano, independentemente da fonte, é usada de maneira ineficaz, comprovando que as atividades antrópicas têm produzido efeitos que afetam o equilíbrio e o funcionamento de comunidades naturais e até mesmo humanas.

A água doce é um recurso precioso e sua escassez pode levar ao estresse hídrico, impactando a agricultura, a indústria e outros setores. O aproveitamento de águas residuárias é cada vez mais considerado como uma oportunidade para atender à demanda de água doce (DINGEMANS et al., 2020).

As motivações para a busca de soluções alternativas que possam diminuir o estresse hídrico são evidentemente importantes. Mesmo que renováveis, os recursos hídricos de qualidade e potabilidade são escassos. Como alternativa, o reúso pode ajudar a diminuir a utilização de águas potáveis para atividades que não necessitam de potabilidade (MOURA et al., 2020).

Segundo a CETESB (2020), o conceito de reúso de água evoluiu de uma prática de subsistência agrícola para uma engenharia de alta complexidade. Historicamente, a humanidade praticou o reúso indireto não planejado desde as primeiras civilizações que se estabeleceram ao longo de rios. No entanto, o marco moderno ocorreu no século XX.

Segundo Asano et al. (2007), a percepção da água como um recurso finito consolidou-se após a década de 1960, com o crescimento das megacidades. O autor

destaca que o projeto de *Santee*, na Califórnia (década de 60), foi um dos pioneiros ao utilizar efluentes tratados para recreação, quebrando o estigma da "água suja".

No Brasil, Hespanhol (2003) aponta que a cultura da abundância hídrica retardou a implementação de políticas de reúso. Entretanto, as crises hídricas nas regiões metropolitanas (especialmente a crise de 2014-2015 no Sudeste) forçaram uma mudança de paradigma: a água de reúso passou a ser vista como um "ativo estratégico" para a resiliência urbana e industrial.

À medida que as populações e a demanda por água aumentam, são necessárias fontes de água mais sustentáveis. O reúso de águas é uma grande oportunidade para suprir as demandas. As águas residuárias tratadas estão disponíveis para aplicações não potável e potável (CUTROVO, 2015).

O reúso de água completa o ciclo do abastecimento de água e esgotamento sanitário, fornecendo uma fonte alternativa de água. As águas residuárias tratadas com o nível de qualidade adequado podem repor o abastecimento de água e reduzir a demanda. A transição para uma economia circular tem o potencial de transformar barreiras atuais relacionadas ao reúso da água (GIAKOUMIS et al., 2020).

No Brasil, ainda não existe regulamentação mandatória de abrangência federal que aborda as diferentes modalidades de reúso de água e seus respectivos padrões. Entretanto, o Programa Interáguas, elaborado no âmbito do governo federal e finalizado em 2018, apesar de não possuir força legal, apresenta diretrizes e orientações para o reúso de água no Brasil, com padrões de qualidade definidos para diferentes modalidades (irrigação, urbano, industrial, ambiental e aquicultura), visando a proteção da saúde pública, a proteção ambiental e as experiências com o tratamento de efluentes para produção de água de reúso. Ressalta-se que o Programa Interáguas apresenta apenas orientações (não padrões) para a recarga de aquíferos (reúso indireto) e para o reúso potável, não sendo esta última opção contemplada em nenhum instrumento regulatório, legal ou infralegal, sobre o reúso de água existente no país (INTERÁGUAS, 2017).

3.2 Legislação do reúso da água em Minas Gerais

A Deliberação Normativa CERH-MG nº 65, de 18 de junho de 2020, estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável proveniente de ETEs, tanto de sistemas públicos quanto privados, com o objetivo de promover maior eficiência no uso dos recursos hídricos.

A normativa define dois tipos de uso e quatro modalidades de reúso. O uso amplo refere-se à água de reúso com qualidade superior para determinada modalidade, possibilitando uma maior diversidade de aplicações. Já o uso limitado corresponde à água de reúso com qualidade inferior, restringindo, portanto, suas possibilidades de utilização.

Quanto às modalidades de reúso, destacam-se:

- Atividades agrossilvipastoris: incluem a fertirrigação de culturas não consumidas cruas, abrangendo culturas alimentícias e não alimentícias, além de forrageiras, pastagens e árvores;
- Uso urbano: compreende a lavagem de praças, pátios, ruas, avenidas, estacionamentos e outros espaços de acesso público, além da lavagem de veículos e usos prediais comerciais ou industriais;
- Fins ambientais: envolvem a aplicação de água de reúso em projetos de recuperação florística ou de áreas degradadas, incluindo fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão, desde que haja controle de acesso às áreas;
- Uso industrial: abrange o emprego da água de reúso em processos operacionais e industriais, incluindo atividades na construção civil, mineração e demais processos produtivos.

Em cada uma dessas 4 modalidades, elas se expandem para o tipo de uso, conforme Tabela 1.

Na Tabela 2, é possível verificar a relação entre o tipo de uso e os padrões de qualidade da água de reúso.

3.3 Modalidades do reúso de água

3.3.1 Reúso rural e agrícola

O Brasil desenvolveu-se em torno de uma cultura de abundância de água que começou a ser questionada recentemente. Na realidade, somente nos últimos anos se tomou consciência das consequências da escassez hídrica, salientando-se o fato de, no ano de 2013, parte significativa do país ter iniciado o seu mais longo processo de seca severa (CUNHA et al., 2015).

A agricultura é o maior consumidor de água doce no mundo. O reúso agrícola, conforme Mancuso e Santos (2017), divide-se em:

- Restrito: Irrigação de culturas que não são consumidas cruas (grãos, fibras, forragens) ou que passam por processamento industrial;
- Não Restrito: Irrigação de alimentos consumidos crus e pastagens para gado leiteiro. Aqui, os critérios microbiológicos são rigorosos (ausência de coliformes termotolerantes e ovos de helmintos).

Tabela 1 - Modalidades de uso e suas restrições

Modalidade	Uso amplo	Uso limitado
Atividades agrossilvipastoris	Fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão	Fertirrigação superficial ou localizada, evitando-se qualquer contato da água de reúso com o produto alimentício.
Uso Urbano	Lavagem de praças, pátios, ruas e avenidas, estacionamentos e outros usos similares em áreas de acesso amplo ao público, além de lavagem de veículos comuns e uso predial comercial ou industrial (restrito a descargas sanitárias)	Lavagem de veículos especiais (caminhões de coleta e transporte de resíduos sólidos domésticos, coleta seletiva, construção civil, mineração, trens e aviões), controle de poeira, combate a incêndio, desobstrução de galerias de água pluvial e rede de esgoto
Ambiental	Aplicação de água para reúso em projetos de recuperação florística ou de áreas degradadas, para fertirrigação superficial, localizada ou aspersão, desde que o acesso a estas áreas seja controlado.	
Industrial	A qualidade da água para reúso para fins de utilização dentro do processo industrial será de responsabilidade do empreendedor, conforme os requisitos de qualidade do processo e as normas de segurança do trabalho.	

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Minas Gerais (2020).

Segundo ANA (2017), 10% das ETEs em operação no Brasil se enquadram no nível primário com eficiência de remoção de matéria orgânica de até 60%; nos níveis primários avançado e secundário, se enquadram 53,7% com eficiência de remoção de matéria orgânica entre 60% e 80%; e 36,5% no nível secundário com eficiências de remoção de matéria orgânica acima de 80%. Dessa última categoria, somente 7% apresentam algum tipo de desinfecção.

Tabela 2 - Padrões de qualidade da água para reúso quanto ao tipo de uso em Minas Gerais

Tipo de uso	**Padrões de qualidade da água para reuso, limite de NMP.**
Urbano amplo	Coliformes: 10^3 NMP/100mL (Ct ou E.coli)
Urbano limitado	Coliformes: 10^4 NMP/100mL (Ct ou E.coli) Desobstrução de galerias pluviais e rede de esgoto: 10^4 NMP/100mL (Ct ou E.coli)
Agrossilvipastoril amplo	Coliformes: 10^4 NMP/100mL (Ct ou E.coli)
Agrossilvipastoril limitado	Coliformes: 10^6 NMP/100mL (Ct ou E.coli)
Ambiental limitado	Coliformes: 10^6 NMP/100mL (Ct ou E.coli)

Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de Minas Gerais (2020).

Segundo Tsagarakis *et al* (2013), afirmam que para a produção de água de reuso para irrigação o tratamento primário remove 30-40% de matéria orgânica e patogênicos; o tratamento secundário com desinfecção, 95%; e o terciário com desinfecção, 99% de carga orgânica e patogênicos. Tzanakakis *et al.* (2011) afirmam que o tratamento primário pode ser usado para irrigação controlada de florestas e parques, desde que sejam tomadas as devidas precauções. O secundário pode ser utilizado para irrigação de árvores cujo fruto não têm contato direto com a água e são processados antes de serem consumidos. Por fim, o tratamento terciário é apropriado para todos os tipos de culturas consumidas por seres humanos.

Em Israel, 97% das Estações de Tratamento de Esgotos recebem tratamento terciário e esse efluente pode ser usado para irrigação de todos os tipos de cultura, sem restrição nenhuma (MARIN, TAL e YERES, 2017).

3.3.2 Reúso industrial (sistema de circuito aberto e fechado)

Nas indústrias, a água de reúso é aplicada principalmente em torres de resfriamento e caldeiras. De acordo com Metcalf & Eddy (2014), a principal característica técnica aqui é o controle de corrosão, incrustação e crescimento biológico (biofilmes). O reúso industrial permite que a planta opere com o conceito de (ZLD), onde todo o efluente é tratado e reincorporado ao processo, eliminando o descarte em corpos hídricos.

3.3.3 Reúso urbano não potável

O reúso urbano não potável inclui o uso em descargas sanitárias, lavagem de ruas e avenidas, combate a incêndios e irrigação de campos de futebol. A vantagem econômica reside na redução do uso de água tratada com padrão de potabilidade (cara e escassa) para fins que não exigem tal pureza.

3.4 Barreiras tecnológicas e processos de tratamento

Para atingir os padrões de qualidade exigidos para o reúso, especialmente o potável, o tratamento convencional (primário e secundário) é insuficiente. A literatura destaca a necessidade de Tratamento Avançado (Terciário).

3.4.1 Processos de separação por membranas (psm)

As membranas revolucionaram o reúso direto. Conforme detalhado por Metcalf & Eddy (2014), a hierarquia de filtração é essencial:

- Microfiltração (MF) e Ultrafiltração (UF): Removem sólidos suspensos, bactérias e protozoários (como Giardia e Cryptosporidium);
- Nanofiltração (NF) e Osmose Reversa (OR): Capazes de remover vírus e sais dissolvidos (desmineralização). A Osmose Reversa é o "padrão ouro" para o reúso potável direto.

3.4.2 Processos oxidativos avançados (poas)

Para eliminar os chamados Contaminantes de Preocupação Emergente (CPEs), como resíduos de fármacos, hormônios e pesticidas que resistem ao tratamento biológico, utiliza-se a combinação de agentes oxidantes (Ozônio, Peróxido de Hidrogênio) com radiação Ultravioleta (UV). Mancuso e Santos (2017) afirmam que os POAs são cruciais para garantir a segurança toxicológica da água de reúso.

A viabilidade técnica e sanitária do reúso de efluentes tratados está condicionada ao atendimento de rigorosos padrões de qualidade, que variam de acordo com a modalidade de aplicação pretendida. Conforme estabelecido pelo Prosab, o controle de contaminantes é determinado por parâmetros fundamentais: os Coliformes Termotolerantes, que indicam a eficiência da desinfecção microbiológica; a presença de Ovos de Helminto, essenciais para mitigar riscos de parasitoses; e a Turbidez, utilizada como indicador de eficácia em processos de filtração terciária para usos mais restritivos.

A Tabela 3 detalha os limites determinados para diferentes atividades, desde a agricultura e aquicultura até usos urbanos e prediais, garantindo a proteção da saúde pública e a preservação ambiental.

T**abela 3:** Parâmetros de qualidade de efluentes sanitários tratados para diferentes tipos de reuso, conforme Prosab.

Tipo de atividade	**Coliformes Termotolerantes**	**Turbidez**
Agrícola irrestrito	$< 10^3$ NMP/100mL ou $< 10^4$ NMP/100mL (Varia conforme forma de irrigação)	≤ 5 UNT (Caso seja usado filtração terciária)
Agrícola restrito	$< 10^4$ NMP/100mL ou $< 10^5$ NMP/100mL (Varia conforme forma de irrigação)	-
Urbano irrestrito	< 200 NMP/100mL	≤ 5 UNT (Caso seja usado filtração terciária)
Urbano restrito	$< 10^4$ NMP/100mL	-
Uso predial	$< 10^3$ NMP/100mL	-
Aquicultura	$< 10^3$ NMP/100mL no tanque de psicicultura ou $< 10^4$ NMP/100mL afluente ao tanque	-

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Prosab (2006).

3.5 Vantagens sustentáveis e o nexo água-energia

A análise de vantagens deve ser dividida em dimensões, conforme a ANA (2017):

Tabela 4 – Vantagens do reúso da água e suas dimensões

Dimensão	Vantagem principal	Justificativa teórica
Ambiental	Redução da Eutrofização	O reúso evita o lançamento de nutrientes (N e P) em rios, prevenindo a proliferação de algas.
Econômica	Estabilidade de Preços	Reduz a dependência de tarifas de concessionárias e tarifas de contingência por escassez.
Social	Disponibilidade Hídrica	Libera água potável de alta qualidade para consumo humano em áreas ou períodos de estresse hídrico.
Técnica	Descentralização	Permite o aproveitamento das estações de reúso localizadas próximas aos polos demandantes (reúso local).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5.1 Dimensão Ambiental: Mitigação da Eutrofização e Vazão Ecológica

A principal vantagem ambiental do reúso reside na interrupção do ciclo de poluição por nutrientes. Segundo Metcalf & Eddy (2014), efluentes domésticos, mesmo após tratamento secundário, retêm altas concentrações de Nitrogênio (N) e Fósforo (P). Quando descartados em corpos d'água, esses nutrientes causam a eutrofização, que é o crescimento descontrolado de algas e a consequente redução de oxigênio dissolvido.

- Mecanismo de Reúso: Ao direcionar esse efluente para a irrigação ou indústria, esses nutrientes são removidos do ciclo aquático. Hespanhol (2003) reforça que, na agricultura, o que seria poluente no rio torna-se fertilizante no solo, reduzindo a necessidade de insumos químicos sintéticos. Além disso, ao utilizar água de reúso, preserva-se a Vazão Ecológica dos rios, garantindo que a fauna aquática sobreviva em períodos de estiagem severa (ANA, 2017).

3.5.2 Dimensão Econômica: Resiliência Financeira e Valorização do Ativo Hídrico

Economicamente, o reúso é uma estratégia de "*hedge*" (proteção) contra a volatilidade hídrica. Asano et al. (2007) argumentam que o custo da inatividade industrial por falta de água supera vastamente o investimento em sistemas de reúso.

- Análise de Custo-Benefício: No Brasil, o Projeto Aquapolo demonstrou que o fornecimento de água de reúso para o Polo Petroquímico de Capuava ofereceu uma tarifa mais estável e competitiva do que a água potável da concessionária local. De acordo com a ANA (2017), o reúso direto planejado elimina custos de transporte de longa distância (transposições), que possuem altíssimo consumo energético e custo de manutenção de adutoras.

3.5.3 Dimensão Social: Justiça Hídrica e Saúde Pública

A dimensão social foca na hierarquia de usos da água. Mancuso e Santos (2017) definem o conceito de "Justiça Hídrica" como a priorização da água de melhor qualidade para o consumo humano e a dessedentação animal.

- Conflitos pelo Uso da Água: Em regiões de estresse hídrico, o uso de água potável para lavagem de ruas ou resfriamento industrial é socialmente questionável. O reúso permite que a água "nobre" permaneça nas torneiras da população, reduzindo o risco de racionamentos e doenças de veiculação hídrica em áreas periféricas que costumam ser as primeiras a sofrer com cortes de abastecimento (HESPANHOL, 2003).

3.6 Projeto Aquapolo

O Aquapolo Ambiental S.A. é o maior empreendimento para a produção de água reciclada na América do Sul e um dos maiores do mundo, com dez anos em operação

completados em 2022 promovendo a diversificação de fonte de água em uma localidade com estresse hídrico estrutural, o que impacta tanto o abastecimento público de água, como as atividades econômicas em larga escala. (AQUAPOLO, 2023).

Segundo o Relatório de Sustentabilidade da Aquapolo 2023, o projeto é pioneiro no Brasil e já foi constituído com a sustentabilidade na essência do seu negócio. O Aquapolo tem capacidade de produzir até 1.000 litros de água reciclada por segundo, volume que equivale ao do abastecimento de uma cidade de 500 mil habitantes. Atualmente, o projeto abastece 12 plantas de oito clientes no Polo Petroquímico de Capuava e no curso da adutora, pertencentes aos setores petroquímico, de cobre, alumínio, automotivo (pneus) e de embalagens plásticas. A água é utilizada em suas atividades industriais. Além do abastecimento de indústrias, há a possibilidade de oferecer água para fins urbanos não potáveis, como atividades de limpeza e construção civil.

Ferreira et al (2018) afirmam que a motivação do projeto derivou dos períodos de estiagem, quando as empresas do Polo Petroquímico do Grande ABC que captam água do rio Tamanduateí, perceberam que o mesmo apresentava vazão insuficiente para o atendimento das demandas de todas as empresas do Polo, tornando necessária a implementação imediata de uma solução alternativa. Dessa forma, evitou-se a utilização do rio Tamanduateí para captação direta ampliou a sua vazão disponível e a utilização dos efluentes tratados voltados para sociedade em seu entorno, priorizando o abastecimento público.

O sistema utiliza tecnologias de ponta, em grande parte automatizadas, para garantir que a água entregue atenda a parâmetros físico-químicos rigorosos exigidos pelos equipamentos industriais, como torres de resfriamento e caldeiras (AQUAPOLO, 2023).

As etapas principais do tratamento compreendem:

- Filtros de Disco: O efluente secundário recebido da ETE-ABC passa inicialmente por filtros de discos rígidos (filtros) que retém sólidos grosseiros e materiais que poderiam danificar as membranas subsequentes com diâmetro nominal de até 400 micras (FERREIRA et al, 2018);
- Tanque Biológico e Sistema TMBR (Biorreator de Membrana Terciário): Através de reatores biológicos em processos anóxicos e aeróbios, micro-organismos removem nitrogênio, fósforo e matéria orgânica remanescente (AQUAPOLO, 2023);

- Ultrafiltração (UF): Utiliza membranas com porosidade de 0,05 μm (1.000 vezes menor que um fio de cabelo), capazes de filtrar vírus, bactérias e sólidos suspensos, tornando o líquido límpido (AQUAPOLO, 2023);
- Osmose Reversa (OR): Cerca de 25% a 30% da água ultrafiltrada passa por esta etapa fisíca altamente sensível para reduzir a salinidade (sais dissolvidos), protegendo os equipamentos dos clientes contra corrosão e incrustação (AQUAPOLO, 2023);
- Blend e Desinfecção: A etapa final envolve a mistura (blend) da água de ultrafiltração com a de osmose para atingir a condutividade contratada. Antes da distribuição, é aplicado dióxido de cloro para garantir a desinfecção ao longo do trajeto até o Polo Petroquímico (AQUAPOLO, 2023; FERREIRA et al., 2018).

3.7 Desinfecção de águas de reúso

Na desinfecção de águas com uso de substâncias químicas, os desinfetantes químicos necessitam ser uniformemente dispersos na água, para garantir uma concentração uniforme; portanto, a agitação favorece a desinfecção (MEYER, 1994).

Quando o cloro é adicionado a uma água quimicamente pura ocorre a seguinte reação:

$$Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HOCl + H^+ + Cl^-$$

Na temperatura ambiente, o tempo de reação é de décimos de segundo (Van, BREMEM 1984). Em solução diluída e pH acima de 4, o equilíbrio da reação é deslocado para a direita, ficando pouco Cl2 em solução. Em valores de pH mais baixos, a reação predominante é no sentido de formação do cloro. O ácido hipocloroso (HOCl), formado pela adição de cloro à água, se dissocia rapidamente.

$$HOCl \rightleftharpoons H^+ + OCl^-$$

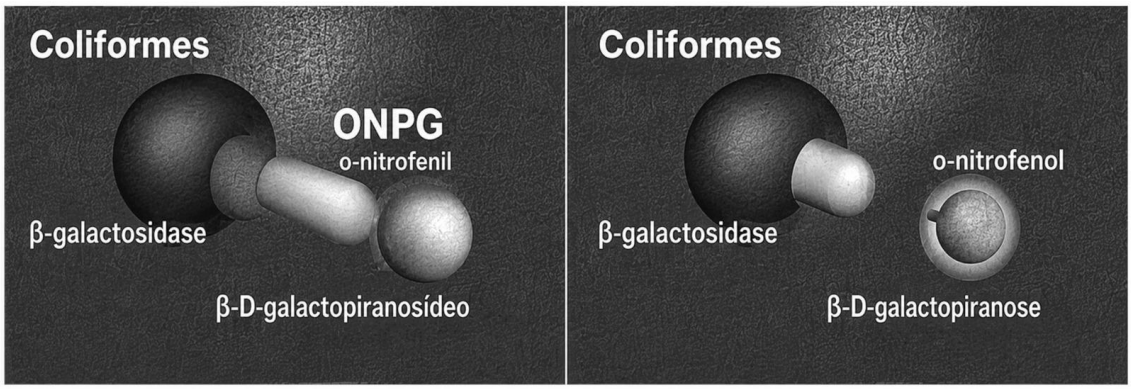
A ação desinfetante e oxidante do cloro é controlada pelo ácido hipocloroso, um ácido fraco. Em solução aquosa e valores de pH inferiores a 6, a dissociação do ácido hipocloroso é fraca, sendo predominante a forma não dissociada (HOCl).

A superioridade da eficiência de desinfecção do ácido hipocloroso em relação a outras formas de cloro é atualmente creditada não somente à sua forte capacidade de oxidação, mas também ao pequeno tamanho de sua molécula e sua neutralidade elétrica, que permitem uma rápida penetração nas células.

A avaliação de contaminantes microbiológicos na água para consumo humano é realizado em laboratório, com a aplicação de testes para verificação da ausência de CT, CF e *E. coli*. O teste mais utilizado é o Cromogénico, pela rapidez nos resultados e facilidade na operação, em contrapartida não apresenta o quantitativo (NMP – Número Mais Provável) na amostra (LIMA; SANTOS 2016).

Através de um substrato Cromogénico, conhecida como Colilert, adota-se uma tecnologia chamada *Difined Substrat Techonology*, DST, para analisar simultaneamente a presença ou não de coliformes totais e *Escherichia Coli*. Este método tem como objetivo a observação ao olho nu, de mudança de coloração da amostra ao receber o substrato. Para tal fundamenta-se na existência de dois nutrientes indicadores, ONPG e MUG (Figura 1), que são as principais fontes de carbono no Colilert e são metabolizados pelas Enzimas B-D-Gluronidade indicando as bactérias coliformes e E. coli respectivamente.

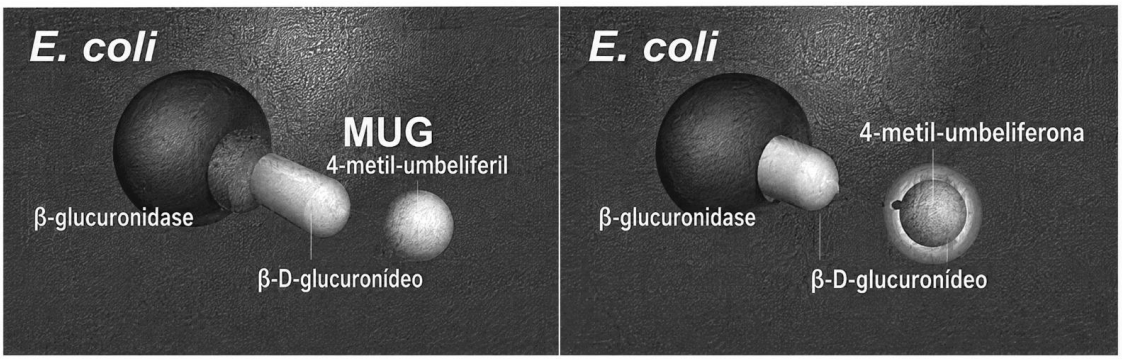
Figura 1: Coliformes usa sua enzima β-galactosidase de metabolizar ONPG e muda de incolor para amarelo.



Fonte: Adaptado LIMA; SANTOS (2016).

Desse modo, os Coliformes se desenvolvem no Colilert usando a galactosidade para metabolizar o ONPG e com isso a amostra incolor passa a ser amarela (Figura 1). A *E. coli* usa a Glucoronidade para metabolizar o MUG gerar fluorescência quando a amostra é exposta a luz UV de 365 nm (Figura 2).

Figura 2: *E. coli* usa enzima β-glicuronídeo para metabolizar MUG e criar fluorescência.



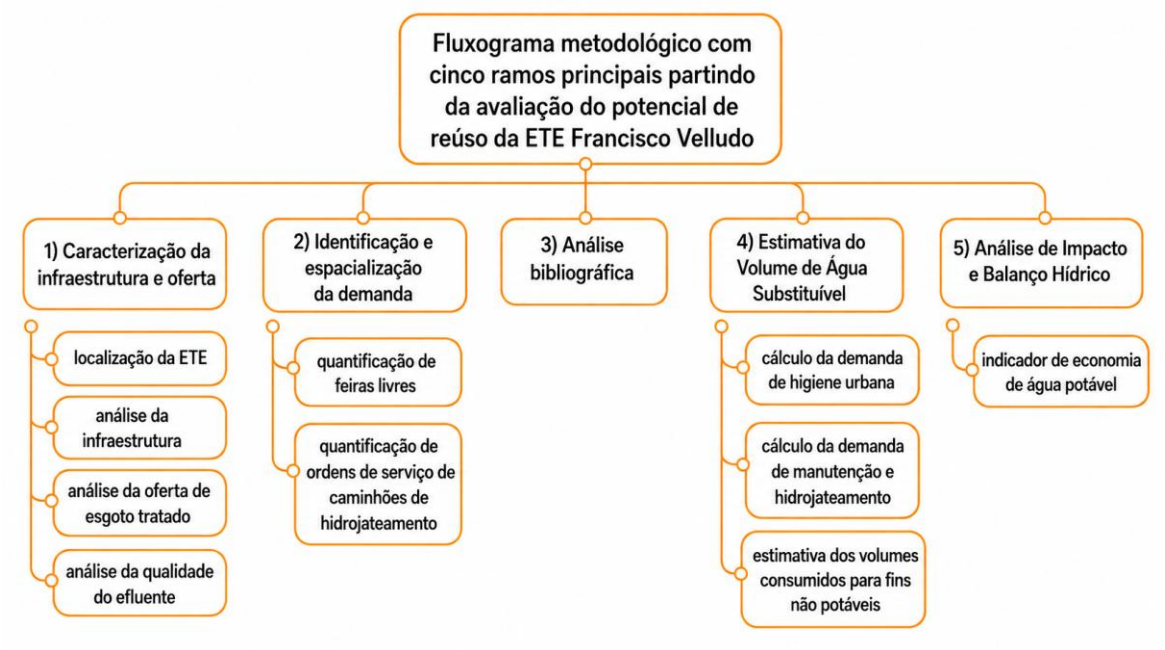
Fonte: Adaptado LIMA; SANTOS (2016).

Após 24hs a 35° na incubadora, a amostra (100mL) pode apresentar três possíveis resultados, quando incolor, o resultado é negativo; amarelo, o resultado é positivo para Coliformes Totais e amarelo/fluorescente, o resultado é positivo para *E. coli.*

4 METODOLOGIA PROPOSTA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem qualitativa, quantitativa dos objetivos propostos. O procedimento metodológico foi estruturado em cinco etapas principais. A primeira etapa consistiu na caracterização, diagnóstico e análise de oferta da ETE. A segunda etapa constitui-se de análise da identificação de possibilidades, visando aplicar o diagnóstico de infraestrutura em um modelo de gestão hídrica sustentável para a CODAU e o município de Uberaba. A terceira etapa constitui-se na elaboração do referencial teórico. A quarta etapa constitui-se em analisar o volume de água substituível e, por fim, a quinta etapa constitui-se em uma análise de impacto ambiental e balanço hídrico. Ver a Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.1 Caracterização da infraestrutura de saneamento e oferta

A viabilidade de um sistema de reúso urbano não potável em Uberaba depende, primordialmente, da caracterização técnica e espacial da unidade geradora de efluente tratado selecionada para o estudo. Nesse contexto, a pesquisa teve como foco a ETE Francisco Velludo, definida como unidade de análise por sua relevância operacional e

potencial de atendimento às demandas de reúso no município. Ressalta-se que o sistema de esgotamento sanitário de Uberaba, sob gestão da CODAU, é composto ainda por outras estações de tratamento, tendo como relevantes a ETE Hugo Rodrigues da Cunha e ETE Filomena Cartafina, as quais, embora não integrem diretamente o escopo deste estudo, compõem o panorama geral da infraestrutura existente.

4.2 ETE Francisco Velludo

A ETE Francisco Velludo é a principal unidade de tratamento de esgoto do município, situada na bacia do Rio Uberaba, abrangendo uma extensa área de contribuição. A estação localiza-se na porção oeste do município de Uberaba, Minas Gerais, com coordenadas aproximadas de 19º43’77’’ S de latitude e 48º00’23’’ O de longitude, a uma altitude de 707 metros.

Devido a sua localização, a ETE se posiciona como local estratégico central para o abastecimento de caminhões de hidrojateamento e limpeza urbana na região oeste de Uberaba e bairros adjacentes.

A unidade foi dimensionada no ano de 2003 para atender a uma população de contribuição de 254.665 habitantes, com vazão média afluente de 465 L/s, vazão máxima de 745 L/s e carga orgânica correspondente de 12.224 kg DBO_5/dia.

A unidade foi projetada para atingir o nível secundário de tratamento, sendo composta por um processo que combina reatores anaeróbios de fluxo ascendente do tipo UASB, seguidos de duas lagoas aeradas de mistura completa - LAMC, que, por sua vez, são seguidas de uma série de lagoas aeradas facultativas - LAF.

No que se refere à infraestrutura, foram levantadas informações relativas à disponibilidade de área física, acessos operacionais e estruturas existentes na unidade. Foi identificada a disponibilidade de área para instalação de sistema de tomada de água e reservatório destinado ao armazenamento de água de reúso. Também foi verificada a existência de espaço para recebimento e manobra de caminhões, incluindo veículos utilizados em serviços de hidrojateamento e limpeza urbana.

Adicionalmente, foram avaliadas as condições da infraestrutura quanto à possibilidade de implantação de sistema de reúso de água, considerando aspectos como o

arranjo físico da estação, acessibilidade interna e integração com as unidades de tratamento existentes. Foram ainda identificadas áreas disponíveis para eventuais ampliações e adequações operacionais.

Em relação às vazões, foram analisados os dados médios mensais da ETE Francisco Velludo referentes ao ano de 2025. A avaliação foi realizada a partir dos registros operacionais da estação, contemplando a variação das vazões ao longo dos meses e possibilitando a caracterização do comportamento hidráulico no período analisado.

No que se refere à qualidade do efluente tratado, foram analisados os dados provenientes do monitoramento operacional da ETE Francisco Velludo ao longo do ano de 2025. A avaliação contemplou parâmetros físico-químicos e microbiológicos, incluindo pH, sólidos sedimentáveis, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), fósforo total, nitrogênio amoniacal e *Escherichia coli*.

Os dados foram organizados em base mensal, a partir de análises laboratoriais realizadas rotineiramente na estação. A sistematização dessas informações permitiu a visualização dos valores registrados ao longo do período, possibilitando a caracterização dos parâmetros de qualidade do efluente tratado com base nos resultados obtidos.

4.3 Identificação e espacialização da demanda

A identificação e espacialização da demanda potencial para o uso de água de reúso urbano não potável foram realizadas a partir do levantamento e análise de atividades operacionais com potencial de consumo no município de Uberaba. A metodologia fundamenta-se na análise dos fluxos operacionais CODAU, permitindo a classificação dos potenciais polos consumidores.

A caracterização da demanda contemplou duas categorias principais. A primeira refere-se aos polos de higiene urbana, representados pelas feiras livres, para os quais foi realizado o levantamento do quantitativo existente no município, bem como sua distribuição espacial. As informações foram obtidas a partir de dados institucionais, considerando a localização, frequência de ocorrência e abrangência territorial dessas atividades.

A segunda categoria compreende os polos de manutenção e infraestrutura, associados às atividades de limpeza e desobstrução de redes de esgotamento sanitário. Para essa análise, foi realizada a quantificação das ordens de serviço relacionadas ao uso de caminhões de hidrojateamento, com base em registros operacionais, contemplando o número de atendimentos e sua distribuição ao longo do período avaliado, bem como, quando disponível, a localização das ocorrências.

As informações levantadas foram organizadas de forma a permitir sua espacialização, por meio da associação dos dados do município. Esse procedimento possibilitou a representação da distribuição territorial das demandas potenciais, subsidiando a identificação de áreas com maior concentração de consumo e contribuindo para análises posteriores relacionadas à viabilidade de implantação de sistemas de reúso.

4.4 Estimativa do Volume de Água Substituível

A quantificação do potencial volume de substituição por Água de Reúso Não Potável (ARNP) constitui etapa analítica da pesquisa, tendo como objetivo mensurar o volume de água associado a usos urbanos não potáveis passíveis de substituição nas rotinas operacionais da CODAU e da administração pública municipal.

A estimativa baseia-se na consolidação dos dados de consumo setorial, estruturada em três frentes de cálculo: demanda de higiene urbana, demanda de manutenção e hidrojateamento e demanda associada a atividades de logística e obras. Para cada categoria, foram definidos critérios e parâmetros técnicos de consumo, com base em dados operacionais e valores de referência.

4.4.1 Cálculo da demanda de higiene urbana

A demanda de água para higiene urbana foi estimada com base na área utilizada pelas feiras livres e logradouros públicos, considerando a aplicação de coeficientes médios de consumo de água por unidade de área e a frequência de realização das atividades.

A estimativa foi realizada conforme a seguinte expressão:

$$Dh = A.Ca.F \quad (1)$$

onde:

Dh = demanda de água para higiene urbana (L/mês ou m³/mês)
A = área média ocupada pelas feiras e logradouros (m²)

Ca = coeficiente de consumo de água por área (L/m²)

F = frequência das atividades de limpeza (eventos/mês)

e ordens de serviço (OS), considerando o número de atendimentos e o volume médio de água utilizado por operação.

A estimativa foi realizada conforme a seguinte expressão:

$$Dhj = Nos.Chj \quad (2)$$

onde:

Dhj = demanda de água para hidrojateamento (L/mês ou m³/mês)
Nos = número de ordens de serviço no período (mês)
Chj = consumo médio de água por operação (L/OS), associado à capacidade dos caminhões e número de ciclos de abastecimento

4.4.2 Estimativa dos volumes de água para fins não potáveis

A estimativa total da demanda de água para fins não potáveis foi obtida a partir da soma das parcelas calculadas:

$$Dtotal = Dh + Dhj \quad (3)$$

onde:

$Dtotal$ = demanda total de água (m³/mês)
D_h = demanda de água para higiene urbana (L/mês ou m³/mês)
D_{hj} = demanda de água para hidrojateamento (L/mês ou m³/mês)

4.5 Análise de Impacto e Balanço Hídrico

A análise de impacto e o balanço hídrico foram realizados com base na relação entre a oferta potencial de efluente tratado e a demanda estimada para usos urbanos não potáveis, conforme os resultados obtidos nas etapas anteriores.

4.5.1 Indicador de economia de água potável

A economia potencial de água potável foi estimada a partir da substituição dos volumes atualmente utilizados em atividades não potáveis pelos volumes equivalentes de água de reúso.

Essa etapa tem como objetivo estruturar indicadores que permitam avaliar o potencial de substituição de água potável por água de reúso, bem como os possíveis impactos associados à sua utilização, considerando aspectos quantitativos.

O indicador foi calculado conforme a Equação (4):

$$EAP = D_{total} \quad (4)$$

onde:
EAP = economia de água potável (m³/mês)

D_{total} = demanda total de água para fins não potáveis (m³/mês)

Adicionalmente, para fins de análise relativa, foi considerado o percentual de substituição em relação ao volume total tratado pela estação, Equação (5):

$$P = \frac{Dtotal}{Q_{eta}} \cdot 100 \quad (5)$$

onde:

P = percentual de substituição (%)

Q_{eta} = Produção de água tratada pela ETA (m³)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A ETE Francisco Velludo está localizada na porção oeste do município de Uberaba, inserida na bacia hidrográfica do Rio Uberaba, o que a posiciona como a principal unidade receptora dos efluentes gerados na área urbana. Sua localização geográfica, associada à ampla área de contribuição atendida, reforça seu papel central no sistema de esgotamento sanitário municipal.

Do ponto de vista operacional, a posição da estação em relação à malha urbana favorece sua utilização como ponto de apoio para atividades externas, especialmente no atendimento à região oeste da cidade. A proximidade com áreas urbanizadas e vias de acesso facilita a logística de deslocamento de caminhões operacionais, como os utilizados em serviços de hidrojateamento e limpeza urbana.

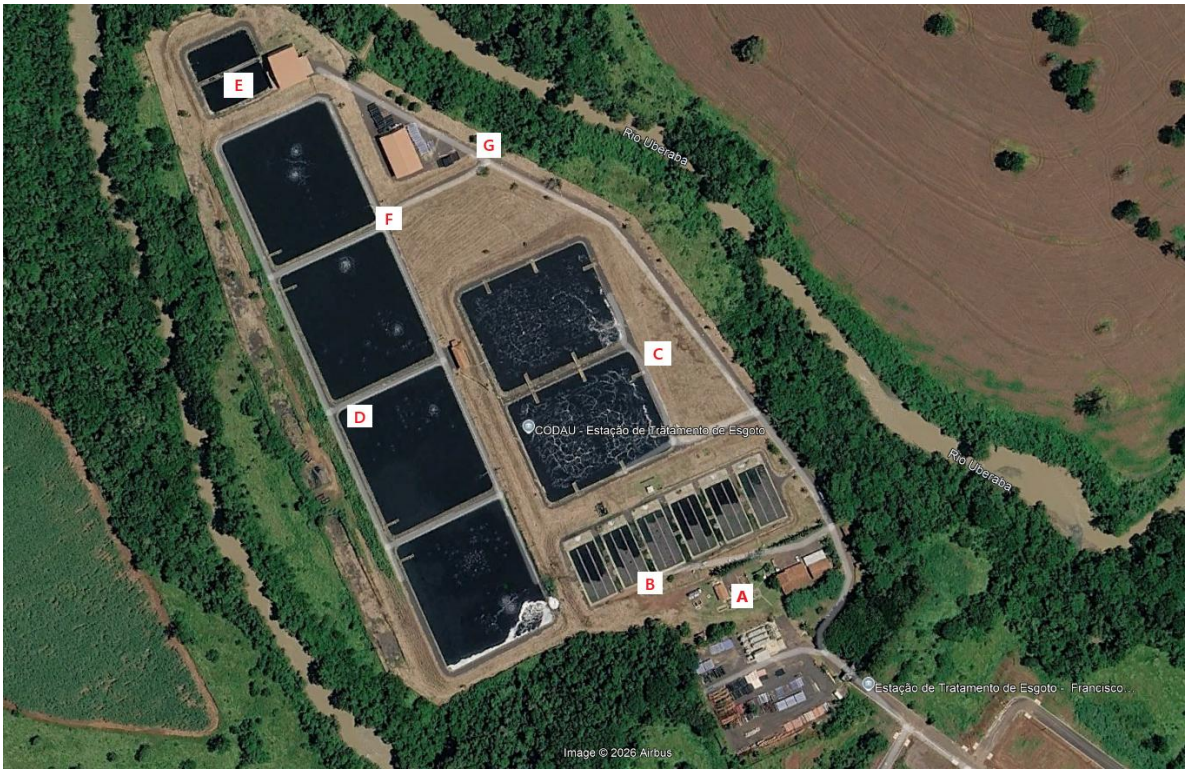
Além disso, a localização periférica da ETE reduz conflitos com áreas densamente ocupadas, o que é um fator relevante quando se considera a implantação de estruturas complementares, como sistemas de armazenamento e distribuição de água de reúso. Essa condição espacial contribui para a viabilidade de expansão das atividades operacionais associadas ao aproveitamento do efluente tratado.

A análise da infraestrutura da ETE Francisco Velludo evidencia que a unidade apresenta configuração compatível com sistemas de tratamento secundário amplamente utilizados no contexto brasileiro, combinando reatores anaeróbios do tipo UASB com lagoas aeradas e facultativas.

Do ponto de vista físico, foi identificada a existência de áreas disponíveis para implantação de estruturas adicionais, incluindo sistemas de tomada de água e reservatórios destinados ao armazenamento de água de reúso. Essa disponibilidade espacial é um fator determinante para a viabilidade de adaptação da unidade sem a necessidade de intervenções estruturais de grande porte.

A estação também apresenta condições adequadas para o tráfego e manobra de caminhões, o que é fundamental para a operação de sistemas de distribuição de água de reúso por transporte. A presença de acessos operacionais e áreas de apoio favorece a integração entre a produção de efluente tratado e seu uso em atividades externas. A Figura 4 consiste na imagem da ETE Francisco Velludo.

Figura 4 – Vista ETE Francisco Velludo



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2026. Legenda: **A** – tratamento preliminar e chegada do efluente; **B** – reatores UASB; **C** – LAMCs; **D** – LAFs; **E** – lagoa de lodo; **F** – caixa de efluente tratado; **G** - lançamento do efluente tratado no corpo receptor.

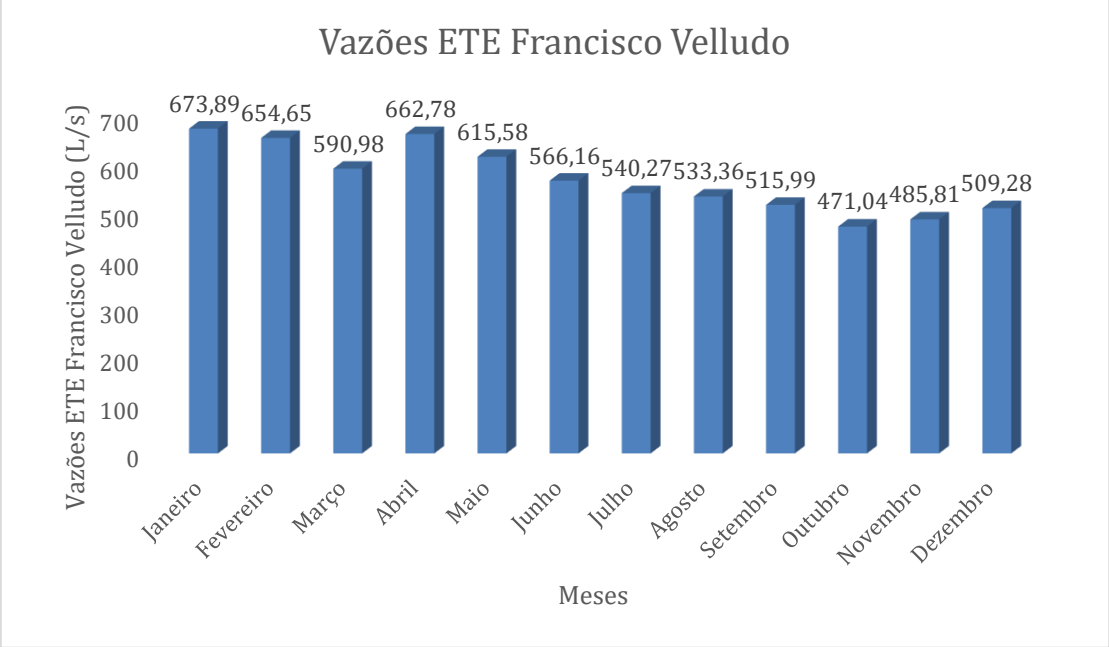
Outro aspecto relevante refere-se à organização do layout da estação, que permite a inserção de novas unidades operacionais de forma integrada ao sistema existente. A configuração atual possibilita a adaptação para captação de efluente tratado em ponto adequado para posterior desinfecção, produzindo água de reúso, sem interferências significativas no processo operacional da ETE.

De forma geral, a infraestrutura observada indica que a ETE possui condições físicas e operacionais favoráveis para a implementação de um sistema de reúso, especialmente em aplicações que não exigem elevado grau de complexidade tecnológica e tratamento.

A análise da oferta de esgoto tratado foi realizada com base nos dados de vazão e nos parâmetros de qualidade do efluente ao longo do ano de 2025, ver o Figura 5.

Em relação às vazões, verificou-se que a estação operou com vazão média de 568,32 L/s, o que, sob a ótica do reúso, representa uma ampliação da oferta potencial de água para fins não potáveis. Na Figura 5, é possível visualizar as vazões mensais de água de reúso do ano de 2025.

Figura 5 - Vazões mensais ETE Francisco Velludo em 2025



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Dessa forma, a combinação entre volumes expressivos de efluente gerado e características de qualidade compatíveis com usos não potáveis (descrito a seguir) indica que a ETE Francisco Velludo apresenta potencial significativo como unidade fornecedora de água de reúso no município.

Para o início dos cálculos de volume, visando ao estabelecimento do balanço de substituição hídrica, faz-se necessária a análise dos dados de qualidade do efluente tratado referentes ao ano de 2025 para compreensão da qualidade necessária para reúso.

Inicialmente, são apresentadas as médias anuais dos seguintes parâmetros: pH, sólidos sedimentáveis, DQO, DBO, fósforo total, nitrogênio amoniacal e coliformes termotolerantes (*E. coli*). Os valores médios obtidos foram, respectivamente: 6,93; 0,16 mL/L; 81,68 mg/L; 24,67 mg/L; 10,41 mg/L; 36,98 mg/L; e $1{,}02 \times 10^{6}$ NMP/100 mL, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Dados do efluente tratado ETE Francisco Velludo 2025

Mês	pH	Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	E.Coli (NMP/100mL)
Janeiro	7,08	0,1	56,61	17,94	8,6	30,48	6,4E+04
Fevereiro	6,83	0,1	54,61	18,74	9	27,8	NR
Março	6,89	0,1	71,62	17,66	98,3	33,4	NR
Abril	6,74	0,84	56,67	21,62	7,84	33,7	1,29E+05
Maio	6,94	0,1	85,55	29,23	15,12	37,97	1,30E+06
Junho	6,83	0,1	104,63	35,75	13,5	37,15	7,5E+05
Julho	6,85	0,1	108,45	34,43	11,32	40,6	5,50E+05
Agosto	6,85	0,1	98,26	31,94	11,7	39,3	9,92E+05
Setembro	7,31	0,1	101,93	28,81	13,5	44,26	2,06E+06
Outubro	6,78	0,1	92,95	24,9	13,5	42,1	1,53E+06
Novembro	7,14	0,1	73,6	20,12	11,1	40,4	4,3E+05
Dezembro	6,94	0,1	75,25	14,95	14,9	36,63	2,40E+06
Médias	6,93± 0,17	0,16 ± 0,21	81,68 ± 19,69	24,67 ± 7,15	19,03 ± 25,08	36,98 ± 4,87	1,02E+06 ± 7,94E+05

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), dados registrados na ETE Francisco Velludo.

Considerando a concentração média de $1{,}02 \times 10^6$ NMP/100 mL (desvio padrão de 7,94E+05) de *E. coli* no efluente tratado, observa-se que esse parâmetro, embora elevado sob a ótica de usos mais restritivos, encontra-se muito próximo do limite estabelecido para modalidades menos exigentes de reúso (reúso agrossivilpastoril limitado e ambiental limitado), o que permite uma análise técnica mais flexível e contextualizada. De acordo com a Deliberação Normativa CERH-MG nº 65/2020, valores nessa ordem de grandeza não devem ser interpretados de forma isolada como impeditivos absolutos, mas sim como indicativos da necessidade de gestão de risco, controle operacional e adequação da aplicação ao tipo de uso pretendido.

É importante destacar que a ETE Francisco Velludo opera com tratamento em nível secundário, não dispondo de etapa terciária voltada à desinfecção do efluente. Dessa forma, a presença de *E. coli* em concentrações da ordem de 10^6 NMP/100 mL é compatível com o desempenho esperado desse tipo de sistema, não configurando falha operacional, mas sim uma limitação inerente ao nível de tratamento empregado. Nesse contexto, pequenas melhorias operacionais ou a eventual incorporação de uma etapa de desinfecção poderiam promover reduções significativas na carga microbiológica, ampliando o leque de possibilidades de reúso.

Mesmo considerando essa limitação, o efluente tratado apresenta potencial estratégico relevante, especialmente quando analisado no contexto local de Uberaba. O município enfrenta recorrentes períodos de escassez hídrica, particularmente durante a estação seca, quando o Rio Uberaba, principal manancial de abastecimento público, sofre reduções significativas de vazão, podendo atingir condições críticas. Nesse cenário, o reúso de água, ainda que em modalidades mais restritas, surge como uma alternativa viável para aliviar a demanda sobre o sistema de abastecimento, promovendo a substituição parcial do uso de água potável em atividades que não requerem padrão de potabilidade.

Sob essa perspectiva, mesmo um efluente com limitações microbiológicas pode desempenhar papel relevante, desde que aplicado em usos compatíveis com sua qualidade, como em atividades ambientais ou agrossilvipastoris controladas. Essa abordagem contribui para a redução da pressão sobre os recursos hídricos naturais, aumentando a resiliência do sistema de abastecimento frente a eventos de escassez. Além disso, reforça a adoção de práticas alinhadas à gestão integrada dos recursos hídricos e à economia circular, especialmente em regiões com alta vulnerabilidade hídrica.

Com base na análise da qualidade do efluente e nas condições operacionais e locais apresentadas, procede-se ao enquadramento nas modalidades de reúso, conforme os critérios estabelecidos pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais na Deliberação Normativa CERH-MG nº 65/2020, o efluente tratado se enquadra nas seguintes categorias de reúso:

- Agrossilvipastoril limitado, que admite concentrações de até 10^6 NMP/100 mL;
- Ambiental limitado, também com limite de até 10^6 NMP/100 mL.

Por outro lado, o reúso urbano limitado, que inclui aplicações como desobstrução de galerias pluviais e redes de esgoto, exige limite mais restritivo ($\leq 10^4$ NMP/100 mL). Para o uso na desobstrução de galerias pluviais, o reúso do efluente tratado sem desinfecção mostra-se inviável, uma vez que a água utilizada é lançada diretamente em corpos hídricos superficiais. Dessa forma, a elevada concentração de coliformes termotolerantes ($1{,}02 \times 10^6$ NMP/100 mL) poderia comprometer a qualidade do corpo receptor, resultando em desconformidade com os padrões ambientais vigentes.

No que se refere à desobstrução de redes de esgoto, observa-se que o esgoto bruto já apresenta concentrações significativamente elevadas de microrganismos patogênicos, incluindo coliformes termotolerantes. Nesse contexto, a utilização de água de reúso sem desinfecção pode ser considerada tecnicamente viável, uma vez que não implicaria em aumento relevante do risco sanitário do sistema.

Entretanto, essa aplicação deve ser analisada com cautela, considerando aspectos operacionais e de biossegurança, especialmente quanto à exposição dos trabalhadores e à possível geração de aerossóis contaminados.

No âmbito do reúso agrossilvipastoril, a aplicação do efluente tratado por meio de fertirrigação superficial ou localizada constitui uma alternativa tecnicamente relevante, sobretudo quando conduzida de forma a evitar o contato direto com as partes comestíveis das culturas. Sistemas localizados, como o gotejamento, preferencialmente subsuperficial, apresentam vantagens significativas ao promover a aplicação controlada no solo, reduzindo riscos sanitários associados à dispersão de microrganismos e à formação de aerossóis.

Do ponto de vista agronômico, destaca-se o potencial de aproveitamento dos nutrientes presentes no efluente, especialmente nitrogênio e fósforo, contribuindo para a redução da demanda por fertilizantes minerais e promovendo ganhos econômicos e ambientais.

Adicionalmente, a prática se insere em uma perspectiva de uso racional da água, favorecendo a conservação de recursos hídricos de melhor qualidade. Por outro lado, a

utilização contínua requer monitoramento sistemático, uma vez que pode acarretar efeitos indesejáveis, como o acúmulo de nutrientes no solo, riscos de lixiviação, particularmente de nitrogênio, e possíveis impactos microbiológicos.

Também devem ser considerados aspectos operacionais e de biossegurança, incluindo a capacitação dos trabalhadores e o controle da exposição ocupacional. Assim, embora a fertirrigação com efluente tratado represente uma estratégia promissora no contexto da economia circular, sua implementação deve estar associada a práticas adequadas de manejo e controle, de modo a maximizar benefícios e mitigar riscos ambientais e sanitários.

No contexto do reúso na modalidade ambiental, a aplicação do efluente tratado em projetos de recuperação florística e de áreas degradadas configura-se como uma estratégia particularmente vantajosa, sobretudo em função do acesso controlado às áreas de aplicação, o que reduz significativamente os riscos associados à exposição humana direta. Diferentemente de outras modalidades mais restritivas, o reúso ambiental permite maior flexibilidade quanto aos métodos de aplicação, incluindo fertirrigação superficial, localizada e por aspersão, o que favorece sua adaptação a diferentes condições de relevo, cobertura vegetal e estágio de recuperação da área.

Do ponto de vista agronômico e ecológico, destaca-se o potencial de aproveitamento dos nutrientes presentes no efluente, especialmente o nitrogênio (36,91 mg/L, com desvio padrão de 4,87) e o fósforo (19,03 mg/L, com desvio padrão de 25,08). Embora essas concentrações sejam significativamente inferiores às encontradas em fertilizantes minerais comerciais, que usualmente apresentam teores na ordem de centenas de gramas por litro ou formulações concentradas (como NPK 20-05-20, por exemplo), o aporte via água de reúso ocorre de forma contínua e distribuída, podendo resultar em cargas acumuladas expressivas ao longo do tempo. Essa característica é particularmente relevante em áreas degradadas, que frequentemente apresentam baixa fertilidade e deficiência de matéria orgânica, tornando o efluente uma fonte complementar de nutrientes e um agente de estímulo à recuperação da atividade biológica do solo.

Além disso, a aplicação do efluente contribui para a melhoria das condições físicas do solo, promovendo aumento da umidade, estímulo à microbiota edáfica e favorecimento do estabelecimento de espécies vegetais, especialmente em regiões com

déficit hídrico ou sazonalidade marcada. Sob a perspectiva ambiental, essa prática está alinhada aos princípios da economia circular, ao promover o reaproveitamento de água e a reciclagem de nutrientes que, de outra forma, seriam descartados em corpos hídricos.

Por outro lado, a utilização contínua do efluente requer avaliação criteriosa quanto aos seus potenciais impactos ambientais. O acúmulo progressivo de nutrientes pode levar à saturação do solo, aumentando o risco de lixiviação de nitrogênio, especialmente na forma de nitrato, e de escoamento superficial contendo fósforo, o que pode contribuir para processos de eutrofização em corpos hídricos adjacentes. Adicionalmente, a presença de microrganismos no efluente, ainda que menos crítica em áreas de acesso restrito, demanda controle operacional e monitoramento, especialmente em situações de possível expansão de uso da área ou interação com fauna.

Outro aspecto relevante refere-se à variabilidade temporal da qualidade do efluente, que pode impactar diretamente a segurança e a eficiência da aplicação. Nesse sentido, torna-se fundamental o estabelecimento de programas de monitoramento contínuo, bem como o controle das taxas de aplicação, de modo a compatibilizar o aporte de água e nutrientes com a capacidade de assimilação do sistema solo-planta.

Assim, o reúso ambiental se apresenta como uma alternativa tecnicamente robusta e ambientalmente sustentável para a destinação do efluente tratado, especialmente em iniciativas de recuperação de áreas degradadas. Contudo, sua implementação deve ser pautada em critérios de manejo adequados, monitoramento sistemático e avaliação de longo prazo, de forma a maximizar os benefícios agronômicos e ecológicos, ao mesmo tempo em que se minimizam os riscos de impactos ambientais adversos.

Com base nos critérios estabelecidos pela Deliberação Normativa CERH-MG nº 65/2020 e nos dados de qualidade do efluente tratado, a Tabela 6 apresenta o enquadramento do efluente nas diferentes modalidades de reúso, a partir da comparação entre os limites de *E. coli* e o valor médio observado em 2025.

5.1 Área de feiras livres no município de Uberaba

A quantificação das feiras livres no município de Uberaba evidencia a forte presença dessa atividade na dinâmica urbana local. Na Tabela 7, é descrita uma relação

das feiras de Uberaba. Esta tabela é importante para realizar o cálculo da demanda de água para a limpeza das vias.

Tabela 6- Enquadramento do efluente tratado nas modalidades de reúso com base na concentração de *E. coli* (2025)

Modalidade de Reúso	Limite E.Coli (NMP/100mL)	Média de E.Coli no Efluente	Atendimento
Agrossilvipastoril limitado	$\leq 10^6$	1,02 x 10^6	Atende
Ambiental limitado	$\leq 10^6$	1,02 x 10^6	Atende
Urbano limitado	$\leq 10^4$	1,02 x 10^6	Não atende

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com o auxílio da Tabela 7, é possível verificar a realização de 20 feiras semanais, e adotando uma média de 4 semanas por mês para fins de simplificação metodológica, estima-se a ocorrência de aproximadamente 80 feiras mensais e 960 feiras ao longo do ano. Esses valores permitem compreender que as feiras livres não se configuram como eventos esporádicos, mas sim como uma atividade contínua e estruturante do cotidiano urbano.

Nesse contexto, a limpeza pós-feira se configura como uma atividade sistemática e indispensável, uma vez que esses eventos promovem intensa ocupação do espaço público, com geração de resíduos orgânicos, líquidos e particulados. Diferentemente de outras demandas de limpeza urbana, que podem apresentar caráter difuso ou eventual, as feiras livres geram uma necessidade de intervenção imediata e padronizada, ocorrendo de forma recorrente e distribuída ao longo de toda a semana. Dessa forma, cada feira realizada implica diretamente em uma operação de limpeza, estabelecendo uma relação praticamente proporcional entre o número de eventos e a demanda por lavagem de vias.

A recorrência de aproximadamente 960 feiras anuais indica que o município está submetido a um regime quase contínuo de operações de limpeza associadas exclusivamente a essa atividade. Isso implica não apenas em mobilização constante de equipes e equipamentos, mas também em um consumo significativo de recursos, dentre os quais se destaca a água utilizada na lavagem das vias.

Tabela 7 - Feiras de Uberaba - Minas Gerais

Dia	Local	Área medida - in loco (m²)
Terça-feira	Rua Donato Cicci - São Benedito	1.715,0
Terça-feira	Avenida Guarapuava - Valim de Melo	525,0
Terça-feira	Avenida Olímpio Jacinto da Silva - Vila Arquelau	635,2
Terça-feira	Rua Doutor Vivaldo Silveira - Rio de Janeiro	790,5
Quarta-feira	Rua Luiz Rodrigo Borges - Mercês	2.610,0
Quarta-feira	Avenida João XXXIII	3.415,0
Quinta-feira	Rua Espanha - Boa Vista	1.184,0
Quinta-feira	Rua Alumínio - Leblon	684,0
Quinta-feira	Avenida Juca Pato - Beija Flor	3.046,5
Quinta-feira	Praça do Quartel - Feirarte	15.883,2
Sexta-feira	Rua Gonçalves Dias - Fabrício	2.289,0
Sexta-feira	Avenida Argemiro Coelho da Silva - Volta Grande	907,5
Sexta-feira	Avenida Egídio Fantato - Manoel Mendes	462,5
Sexta-feira	Praça Dom Eduardo - Feirarte	6.480,1
Sábado	Avenida Osvaldo Cruz - Estados Unidos	3.400,0
Sábado	Avenida João XXXIII - Bonsucesso	830,0
Sábado	Av. Joaquim Borges de Assunção - Alfredo Freire	875,0
Sábado	Avenida José Solé Filho - Serra Dourada	485,0
Sábado	Praça Jorge Frange - Feirarte	9.345,2
Domingo	Avenida Prudente de Morais	16.100,0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026), usando informações da CODAU.

Outro aspecto relevante é que a elevada frequência das feiras contribui para transformar a limpeza urbana em um processo intensivo e repetitivo, o que pode amplificar eventuais ineficiências operacionais. A ausência de diferenciação entre feiras de distintos portes, por exemplo, pode levar ao uso de volumes de água não ajustados à real necessidade de cada situação. Da mesma forma, a falta de monitoramento detalhado pode dificultar a identificação de oportunidades de otimização, tanto no consumo de água quanto na logística das operações.

Dessa forma, a análise integrada entre o quantitativo de feiras e a necessidade de limpeza urbana permite evidenciar que essa atividade representa uma demanda significativa e contínua por recursos hídricos no município. Esse entendimento é fundamental para subsidiar discussões mais amplas sobre sustentabilidade e gestão eficiente da água, especialmente no que se refere à possibilidade de adoção de fontes alternativas, como o reúso de água, em atividades que não requerem padrão potável.

5.2 Quantificação de ordens de serviços do município de Uberaba

Em relação a quantificação da quantidade de ordens de serviço de caminhões de hidrojateamento, é importante entender sua funcionalidade e onde pode ser utilizado. O caminhão de hidrojateamento é um equipamento fundamental nas operações de manutenção de sistemas de esgotamento sanitário, sendo amplamente utilizado para desobstrução e limpeza de redes coletoras. Trata-se de um sistema composto, de modo geral, por um reservatório de água, uma bomba de alta pressão, carretéis com mangueiras e diferentes tipos de bicos, projetados para atender às especificidades de cada intervenção.

Seu funcionamento baseia-se na aplicação de jatos de água em alta pressão no interior das tubulações, promovendo o desprendimento e o arraste de materiais acumulados, como sedimentos, gordura, areia e outros detritos que possam comprometer o escoamento do esgoto. Em muitos casos, o hidrojateamento é associado a sistemas de sucção (caminhões combinados), permitindo não apenas a desobstrução, mas também a remoção eficiente dos resíduos, evitando sua redistribuição na rede.

Do ponto de vista operacional, o uso desse equipamento é essencial para a manutenção preventiva e corretiva do sistema de esgoto. Intervenções desse tipo contribuem diretamente para a redução de extravasamentos, mitigação de odores e

melhoria do desempenho hidráulico da rede. No entanto, trata-se de uma atividade que demanda planejamento, uma vez que envolve consumo de água, deslocamento de equipes e utilização de equipamentos de maior complexidade.

No contexto do município de Uberaba, cada intervenção realizada com caminhão de hidrojateamento está associada à emissão de uma ordem de serviço, que registra a execução da atividade. Dessa forma, a quantificação dessas ordens permite avaliar, de maneira indireta, a frequência e a intensidade das ações de manutenção na rede de esgoto.

Assim, a Tabela 8 apresenta a quantificação das ordens de serviço relacionadas ao uso de caminhões de hidrojateamento, constituindo um elemento essencial para a avaliação da dinâmica operacional do sistema de esgotamento sanitário e para a identificação do volume de água gasto durante a execução do serviço.

Tabela 8 - Quantidade de ordens de serviço de caminhões de hidrojateamento do ano de 2025.

Serviço executado	Quantidade de ordem de serviço
Desobstrução de Ramal de Esgoto	3470
Desobstrução de Redes de Esgoto	529
Vazamento no Poço de Visita	1289

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026), com dados acumulados na CODAU.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, a consolidação das ordens de serviço (OS) relacionadas às operações com caminhões de hidrojateamento no município de Uberaba totaliza 5.288 intervenções. Esse quantitativo evidencia não apenas a elevada demanda por serviços de manutenção na rede de esgotamento sanitário, mas também implica, de forma direta, em um consumo expressivo de água, uma vez que o hidrojateamento depende do uso de jatos sob alta pressão para a remoção de resíduos e desobstrução das tubulações. Ainda que o volume utilizado por intervenção possa variar conforme a complexidade do serviço, a recorrência dessas operações ao longo do período analisado caracteriza um uso intensivo e contínuo de recursos hídricos.

Nesse contexto, destaca-se que a natureza dessa atividade não exige, do ponto de vista técnico, o uso de água potável, o que abre espaço para a inserção de estratégias de

substituição hídrica. A utilização de água de reúso proveniente de estações de tratamento de esgoto surge, portanto, como uma alternativa viável e alinhada aos princípios de sustentabilidade, especialmente considerando que se trata de um uso não potável e operacional. Além disso, a previsibilidade e a frequência das intervenções associadas ao hidrojateamento favorecem o planejamento logístico para o fornecimento desse tipo de água, potencializando sua aplicação em larga escala.

Dessa forma, o elevado número de ordens de serviço não apenas reforça a pressão sobre os serviços de saneamento, mas também evidencia uma oportunidade concreta de otimização no uso da água. A incorporação de água de reúso nessas atividades pode contribuir significativamente para a redução da demanda por água potável, promovendo maior eficiência operacional e integração entre os sistemas de esgotamento sanitário e gestão de recursos hídricos no município.

5.3 Estimativa do volume de água passível de substituição no município de Uberaba

Para a estimativa do volume de água passível de substituição, torna-se necessário o levantamento do consumo associado tanto à higiene urbana das feiras livres quanto às atividades de manutenção da rede de esgotamento sanitário.

5.4 Levantamento de demanda hídrica para higiene urbana no município de Uberaba

No que se refere à higiene urbana, adotou-se como base de cálculo a utilização de um caminhão-pipa por feira, com capacidade de reservatório de 15 m^3. A partir da aplicação da Equação (1), considerando um coeficiente de consumo de água por área (Ca) de 15 L/m^2 e considerando uma frequência semanal das feiras no município de Uberaba, estimou-se um consumo de água de total de 4299,8 m^3. O cálculo realizado por feira pode ser visto na Tabela 9.

Após isso, é possível realizar o somatório gasto mensalmente de água para realizar a limpeza das feiras, e, com isso, calcular a quantidade da demanda gasto anualmente. Com isso, chegou-se em um valor anual aproximado de 51.597.144 L/ano ou 51.597,1 m^3/ ano.

Tabela 9 - Cálculo da demanda de água para limpeza das feiras mensal

Local	Área medida - in loco (m^2)	Coeficiente de consumo de água (15 L/m^2)	Frequência de limpeza	Demanda de água para higiene urbana
R. Donato Cicci	1.715,0	15	4	102900
Av. Guarapuava	525,0	15	4	31500
Av. Olímpio Jacinto da Silva	635,2	15	4	38112
R. Doutor Vivaldo Silveira	790,5	15	4	47430
R. Luiz Rodrigo Bores	2.610,0	15	4	156600
Av. João XXXIII	3.415,0	15	4	204900
R. Espanha	1.184,0	15	4	71040
R. Alumínio	684,0	15	4	41040
Av. Juca Pato	3.046,5	15	4	182790
Praça do Quartel	15.883,2	15	4	952992
R. Gonçalves Dias	2.289,0	15	4	137340
Av. Argemiro Coelho da Silva	907,50	15	4	54450
Av. Egídio Fantato	462,50	15	4	27750
Praça Dom Eduardo	6.480,1	15	4	388806
Av. Osvaldo Cruz	3.400,0	15	4	204000
Av. João XXXIII	830,0	15	4	49800
Av. Joaquim Borges de Assunção	875,0	15	4	52500
Av. José Solé Filho	485,0	15	4	29100
Praça Jorge Frange	9.345,2	15	4	560712
Av. Prudente de Morais	16.100,0	15	4	966000

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

5.5 Levantamento da demanda hídrica utilizada na manutenção de redes coletoras no município de Uberaba

Considerando a média anual de 5.288 ordens de serviço, obtém-se uma média mensal de aproximadamente 440,7 atendimentos. Para a execução dos serviços, serão utilizados caminhões de hidrojateamento com vazão mínima de 150 litros por minuto e pressão de trabalho de 130 kgf/cm². Considerando um tempo médio de operação de aproximadamente 12,5 minutos para o rompimento de obstruções e limpeza do trecho, estima-se um consumo de cerca de 1.875 litros de água por ordem de serviço, conforme cálculo abaixo:

150 L/min x 12,5 min = 1.875 L/OS

Dessa forma, multiplicando-se o consumo estimado por ordem de serviço pela média mensal de atendimentos, obtém-se um consumo aproximado de 826.312,5 litros de água por mês:

440,7 OS/mês x 1875 L/os = 826.312,5 L/mês

Com base no consumo mensal estimado de aproximadamente 826.312,5 litros de água para execução dos serviços de hidrojateamento, o consumo anual é estimado em cerca de 9.915.750 litros. Convertendo-se esse volume para metros cúbicos, obtém-se um quantitativo anual aproximado de 9.915,75 m³ de água utilizados nas operações.

5.6 Estimativa total da demanda hídrica no município de Uberaba

A partir dos dados levantados para a higiene urbana das feiras e para as atividades de manutenção das redes de esgotamento sanitário, é possível estimar o volume total de água consumido em usos não potáveis. Com a aplicação da Equação (3), obtém-se um valor de 61.512,85 m³, o qual, conforme definido na Equação (4), corresponde ao indicador de economia de água potável, representando o potencial de substituição por fontes alternativas, como a água de reúso. Na Tabela 10, são descritos os valores de consumo de água por atividade e o somatório gasto de água potável.

Tabela 10 - Volume de água gasto por atividade

Atividade	Volume gasto de água anual (m^3)
Limpeza das vias públicas	51.597,1
Manutenções das redes de esgotamento sanitário	9.915,75
Total	61.512,85

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

5.7 Economia anual ao usar água de reúso nas atividades registradas

No ano de 2025, a Estação de Tratamento de Água do município de Uberaba registrou um volume de 35.952.612 m^3 de água tratada e distribuída. A partir desse dado, foi possível determinar a representatividade do consumo destinado a usos não potáveis em relação ao total produzido, resultando em aproximadamente 0,17%. Embora esse percentual possa parecer reduzido à primeira vista, ele representa um volume absoluto significativo, evidenciando o potencial de adoção de estratégias voltadas à substituição de água potável por água de reúso em atividades operacionais do município.

5.8 Dimensionamento do tanque de cloração

Para realizar o dimensionamento do tanque de cloração, foi considerado uma vazão de 61.512,85 / ano. Segue os cálculos para realizar o dimensionamento do tanque: $Q = 61.512{,}85\ \frac{m^3}{ano} \cdot \frac{1\ ano}{365\ d} . \frac{1d}{24h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 1{,}95x10^{-3}\ m^3/\text{s}$

O tempo de contato do cloro com o efluente tratado será de 30 minutos, conforme a Norma ABNT NBR 13969, e, com isso, calculado o volume do tanque:

$$Q = \frac{V}{t} \rightarrow V = Q \cdot t \rightarrow V = 1{,}95x10^{-3}\frac{m^3}{s} \cdot 30\text{min} \cdot \frac{60s}{1\ min} \rightarrow V = 3{,}51\ m^3$$

Para realizar o cálculo da geometria do tanque, foi definido um nível de água (H) no tanque de contato de 1,25 metros.

$$A = \frac{V}{H} = \frac{3{,}51}{1{,}25} = 2{,}8 \cong 3\ m^2$$

Admitindo uma relação entre o comprimento e largura entre 2 e 4, conforme a NBR 7229/1993 (L = 3B), foi efetuado o dimensionamento.

Assim, L = 3 metros.

A Tabela 11 apresenta os parâmetros utilizados e as dimensões do tanque de contato.

Tabela 11 - Dimensões tanque de contato

Parâmetros	Dados
Vazão	$1{,}95x10^{-3}\ m^3$/s
Tempo de contato	30 minutos
Volume do tanque	3,75 m³
Área do tanque	3 m^2
Altura do efluente no tanque	1,25 m
Largura do tanque	1 m
Comprimento do tanque	3 m

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

5.9 Testes laboratoriais de dosagem de cloro para redução do teor de E.Coli

Os testes de dosagem de cloro têm o objetivo de reduzir o parâmetro de coliforme termotolarantes a parâmetros aceitáveis de utilização para as atividades de água de reúso. De acordo com a NBR 13969 (ABNT, 1997) o efluente tratado deve possuir valores de cloro residual acima de 0,5 mg/L não podendo ultrapassar o valor máximo permitido pela Portaria MS 1.469 (Ministério da Saúde, 2000) que é de 2,0 mg/L. O produto utilizado foi o hipoclorito de sódio 12% (m/m). A coleta foi realizada pelo CODAU, conforme APHA/AWWA/WEF. *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22 ed Washington, D.C.: American Public Health Association. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos. CETESB – ANA 2011. ABNT/NBR 9898/87.

Foram realizadas análises microbiológicas em amostras de efluente tratado submetidas à desinfecção com hipoclorito de sódio, utilizando-se dosagens correspondentes a 0,13 mL e 0,18 mL da solução desinfetante para 1 litro de efluente. A amostra de efluente tratado sem adição de hipoclorito apresentou concentração de

coliformes termotolerantes de 460.000 NMP/100 mL, evidenciando a necessidade de uma etapa de desinfecção para adequação da qualidade microbiológica do efluente.

Figura 6 - Análise microbiológica de coliformes



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Após a aplicação de 0,13 mL de hipoclorito, a concentração de coliformes termotolerantes foi reduzida para 92 NMP/100 mL, correspondendo a uma eficiência de remoção de 99,98%. Já para a dosagem de 0,18 mL, observou-se uma concentração final de 36 NMP/100 mL, resultando em uma eficiência de remoção de 99,99%. Esses resultados demonstram a elevada eficiência do processo de desinfecção por cloração na inativação de microrganismos indicadores de contaminação fecal, promovendo reduções superiores a quatro ordens de magnitude na concentração de coliformes termotolerantes.

Comparando-se as duas dosagens avaliadas, verifica-se que ambas foram capazes de proporcionar significativa melhoria da qualidade microbiológica do efluente, sendo que a dosagem de 0,18 mL apresentou desempenho ligeiramente superior. Entretanto, a diferença entre os resultados obtidos não foi expressiva, uma vez que ambas as condições produziram concentrações finais bastante reduzidas de coliformes termotolerantes, ver a Tabela 12.

Apesar da elevada eficiência microbiológica observada para ambas as dosagens de hipoclorito de sódio, os resultados obtidos não foram suficientes para viabilizar a utilização do efluente para reúso. Isso porque, além do atendimento aos critérios microbiológicos, as diretrizes de reúso também exigem a manutenção de uma

concentração mínima de cloro residual livre, de forma a garantir a proteção sanitária durante o armazenamento, transporte e utilização da água de reúso.

Durante os ensaios realizados, verificou-se que, embora as dosagens de 0,13 mL e 0,18 mL tenham promovido remoções de 99,98% e 99,99% dos coliformes termotolerantes, respectivamente, os valores de cloro residual livre obtidos após o tempo de contato permaneceram inferiores a 0,5 mg/L. Dessa forma, os efluentes desinfetados não atenderam integralmente aos requisitos recomendados para reúso, uma vez que a ausência de um residual mínimo de desinfetante pode comprometer a manutenção da qualidade microbiológica ao longo do tempo.

Tabela 12 – Resultados da análise microbiológica.

Volume de hipoclorito (mL)	**Cloro residual livre (mg/L)**	**Resultado dos coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)**	**Eficiência de remoção (%)**
0,13	0,38	92	99,98
0,18	0,45	36	99,99

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Como o valor de cloro residual de hipoclorito dosado de 0,18 mL ficou próximo do permitido na NBR 13969, foram feitos testes a partir de 0,2 mL até 1,0 mL. A tabela 13 demonstra a relação entre o volume de hipoclorito de sódio dosado, a quantidade de cloro residual livre após os 30 minutos de contato, a massa de cloro dosada e a concentração da solução.

A partir dos dados de cloro residual livre, é possível verificar que conforme ocorre o aumento do volume dosado a quantidade de cloro residual livre aumenta. Na Figura 7, é possível visualizar essa correlação.

Com base nos resultados obtidos para cloro residual livre, verificou-se que a dosagem de 0,2 mL de hipoclorito de sódio foi a menor capaz de atender ao valor mínimo recomendado de 0,5 mg/L de cloro residual livre, apresentando concentração residual de 0,6 mg/L após o tempo de contato. Considerando que o hipoclorito utilizado possui

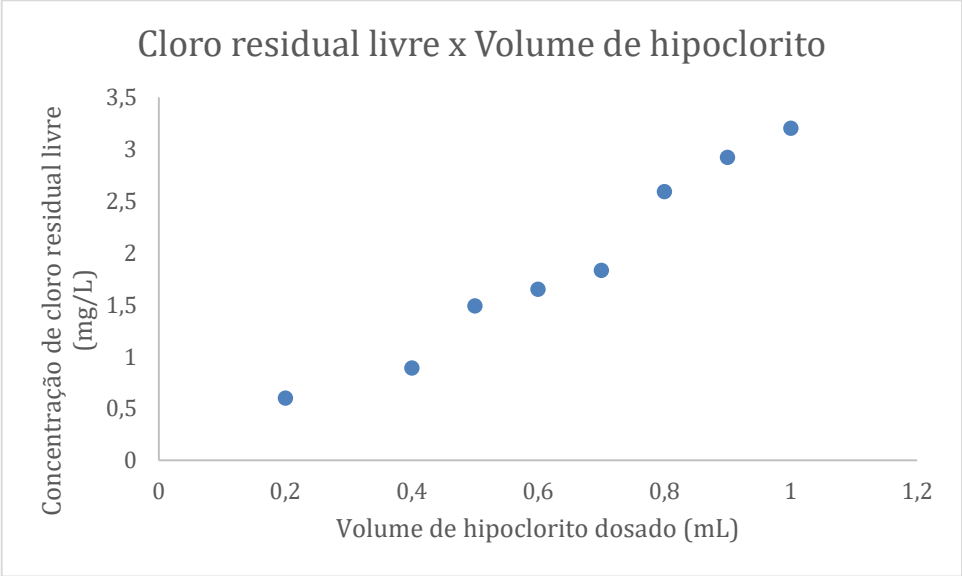
concentração de 12%, essa dosagem corresponde a uma aplicação aproximada de 24 mg/L de cloro disponível.

Tabela 13 – Testes de cloro residual livre para 1 litro de efluente

Volume de efluente (litros)	Volume de NaClO (mL)	Cloro residual livre (mg/L)	Massa de cloro dosada (mg)	Concentração da solução (mg/L)
1	0,2	0,6	24	24
1	0,4	0,89	48	48
1	0,5	1,49	60	60
1	0,6	1,65	72	72
1	0,7	1,83	84	84
1	0,8	2,59	96	96
1	0,9	2,92	108	108
1	1,0	3,2	120	120

Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Figura 7 - Correlação de cloro com volume hipoclorito utilizado



Fonte: Elaborado pelo Autor (2026).

Dessa forma, os ensaios subsequentes podem ser conduzidos utilizando dosagens compreendidas entre 0,2 mL e 0,7 mL de hipoclorito de sódio, faixa na qual foram observadas concentrações de cloro residual livre variando de 0,6 mg/L a 1,83 mg/L, respectivamente. Importante ressaltar que a carga do efluente pode mudar conforme a época do ano, e, por isso, a dosagem de cloro para neutralizar os coliformes termotolerantes do efluente tratado pode variar.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica da implantação de um sistema de reúso de água a partir do efluente tratado da Estação de Tratamento de Esgoto Francisco Velludo, no município de Uberaba-MG, considerando aspectos relacionados à disponibilidade hídrica, qualidade do efluente, demandas potenciais de consumo e adequação aos critérios estabelecidos pela legislação vigente.

Os resultados demonstraram que a ETE Francisco Velludo apresenta características estruturais e operacionais favoráveis para a implementação de programas de reúso. Sua localização estratégica na porção oeste do município, associada à ampla área de contribuição atendida, à disponibilidade de áreas para implantação de estruturas complementares e à facilidade de acesso para veículos operacionais, constitui um conjunto de fatores que favorece a adaptação da unidade para atuar como fornecedora de água de reúso.

Sob a perspectiva quantitativa, verificou-se que a estação operou, durante o ano de 2025, com vazão média de 568,32 L/s, evidenciando elevada disponibilidade de efluente tratado. Esse volume representa uma fonte hídrica alternativa significativa, especialmente em um contexto de crescente pressão sobre os recursos hídricos e de recorrentes períodos de estiagem observados no município de Uberaba, cuja principal fonte de abastecimento é o Rio Uberaba.

A avaliação da qualidade do efluente tratado indicou que os parâmetros físico-químicos analisados apresentaram comportamento compatível com sistemas de tratamento secundário compostos por reatores UASB seguidos de lagoas aeradas e facultativas. Entretanto, a concentração média de E. coli observada ao longo do período de estudo ($1{,}02 \times 10^6$ NMP/100 mL) demonstrou que o efluente, na condição atual de operação, não atende aos requisitos microbiológicos exigidos para modalidades mais restritivas de reúso, especialmente aquelas relacionadas ao reúso urbano limitado.

Por outro lado, a análise normativa permitiu verificar que o efluente tratado apresenta potencial para enquadramento nas modalidades de reúso agrossilvipastoril limitado e ambiental limitado, conforme estabelecido pela Deliberação Normativa CERH-MG nº 65/2020. Nesse contexto, destacam-se aplicações relacionadas à

recuperação de áreas degradadas, reflorestamento, fertirrigação controlada e outras atividades que apresentam menor potencial de exposição humana direta.

Além da disponibilidade hídrica, observou-se que o efluente possui potencial agronômico decorrente da presença de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, que podem contribuir para a fertilização de solos e para a recuperação da produtividade de áreas degradadas. Tal característica reforça a inserção do reúso de água nos princípios da economia circular, promovendo simultaneamente a reciclagem de água e nutrientes.

A avaliação das demandas municipais identificou duas aplicações com elevado potencial para substituição de água potável: a limpeza urbana associada às feiras livres e as operações de hidrojateamento para manutenção das redes de esgotamento sanitário. Os resultados indicaram consumo anual estimado de aproximadamente 51.597 m³ para lavagem de vias após feiras livres e 9.916 m³ para operações de hidrojateamento, totalizando uma demanda potencial de 61.513 m³ por ano.

Embora esse volume represente apenas aproximadamente 0,17% da produção anual de água tratada do município, sua substituição por água de reúso configura uma medida relevante sob a ótica da gestão sustentável dos recursos hídricos, contribuindo para a redução da demanda sobre os sistemas de abastecimento público e para o aumento da resiliência hídrica municipal, especialmente nos períodos de estresse hídrico do Rio Uberaba onde sua oferta se reduz significativamente. Essa relevância e a própria viabilidade da proposição podem ser ainda mais ampliadas ao se considerar que, além do uso inicialmente estimado para limpeza urbana e hidrojateamento, o efluente tratado pode ser direcionado também para outras atividades, tais como a irrigação de áreas verdes públicas, a desobstrução de galerias pluviais, umectação de vias e canteiros de obras para controle de poeira, bem como a lavagem de pátios e frotas de veículos leves e pesados dentre outras. A inserção do recurso nessas frentes secundárias potencializa a substituição da água nobre, consolidando o projeto dentro dos preceitos da conservação de água potável, otimizando ainda mais o seu impacto socioambiental.

Os ensaios de desinfecção realizados demonstraram que a aplicação de hipoclorito de sódio a 12% foi altamente eficiente na redução da carga microbiológica do efluente. As dosagens de 0,13 mL e 0,18 mL de cloro para 1 litro de efluente proporcionaram reduções de 99,98% e 99,99% dos coliformes termotolerantes, respectivamente, reduzindo as concentrações de 460.000 NMP/100 mL para valores de 92 NMP/100 mL e

36 NMP/100 mL. Entretanto, verificou-se que essas dosagens não foram suficientes para garantir concentrações de cloro residual livre superiores a 0,5 mg/L após o tempo de contato, requisito recomendado para assegurar a manutenção da qualidade microbiológica da água de reúso. Em função disso, foram realizados novos ensaios com dosagens variando de 0,2 mL a 1,0 mL de hipoclorito de sódio.

Os resultados evidenciaram que a dosagem de 0,2 mL, correspondente a aproximadamente 24 mg/L de cloro aplicado, foi a menor capaz de atender simultaneamente ao critério microbiológico e ao requisito mínimo de cloro residual livre, apresentando concentração residual de 0,6 mg/L após 30 minutos de contato. Adicionalmente, observou-se que dosagens compreendidas entre 0,2 mL e 0,7 mL mantiveram concentrações residuais entre 0,6 mg/L e 1,83 mg/L, permanecendo dentro da faixa operacional recomendada para aplicações de reúso.

Dessa forma, conclui-se que a ETE Francisco Velludo apresenta viabilidade técnica para atuar como unidade fornecedora de água de reúso no município de Uberaba. Os resultados demonstram que, mediante a incorporação de uma etapa complementar de desinfecção por cloração, o efluente tratado pode atingir padrões compatíveis com diferentes modalidades de reúso não potável, ampliando significativamente seu potencial de aproveitamento.

Por fim, destaca-se que a implementação de programas de reúso na ETE Francisco Velludo poderá contribuir para a conservação dos recursos hídricos, redução da demanda por água potável, fortalecimento da segurança hídrica municipal e promoção dos princípios da economia circular. Recomenda-se, para estudos futuros, a realização de avaliações econômicas detalhadas, análises de risco microbiológico, monitoramento de longo prazo da qualidade do efluente e estudos voltados à aplicação prática da água de reúso em escala operacional, visando subsidiar a consolidação de políticas públicas municipais para o reúso planejado de água.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA; Encarte especial sobre a crise hídrica, conjuntura dos recursos hídricos do Brasil 2014; Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR; Brasília – DF; 2015. Agric. For Meteorol, v. 214, p. 494 - 505. 2015

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas. Brasília: ANA, 2017.

AQUAPOLO. Relatório de Sustentabilidade 2023. São Paulo: Aquapolo, 2023. Disponível em: https://www.aquapolo.com.br/media/upload/ckeditor/2023/12/08/aquapolo_rs2022_d4-04.pdf. Acesso em: 25 fev. 2026.

ASANO, T. Waste water reuse for non-potable applications. 2002. In: GOHRNGUER, S. S. Uso Urbano Não Potável de Efluentes de Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário. Estudo de Caso: Município de Campo Largo - PR. 2006. 238 f. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

ASANO, T.; BURTON, F.; LEVERENZ, H.; TSUCHIHASHI, R.; TCHOBANOGLOUS, G. Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. 1. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2007.

AZEVEDO, N. M. G. ; AZEVEDO FILHO, J. D. M. ; ALBUQUERQUE, C. C. . Governança dos Recursos Hídricos no Amazonas: construção de cenários e perspectivas. In: IV Seminário Nacional ProfÁgua, 2022, Brasília. IV Seminário Nacional ProfÁgua. São Carlos - SP: RiMa Editora, 2022. p. 143-145

BARROS, H.M.M.; VERIATO, M.K.L.; SOUZA, L.P.; CHICÓ, L.R.; BAROSI, K.X.L. Reúso de água na agricultura. 2015. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 10, n. 5, p. 11-16. Disponivel em: . Acesso em: 19 de fev de 2026.

BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, C. E. M.; Águas Doces no Brasil, Capital Ecológico, Uso e Conservação; 4ª Edição; Cap. 5 – Monitoramento de Quantidade e Qualidade das águas; Pg. 127 – 142; Editora Escrituras; São Paulo; 2015.

BREGA FILHO, D.; MANCUSO, P.C.S. Capítulo 2 – Conceito de reúso de água. In: REÚSO DE ÁGUA. Barueri, SP: Manole, 2003.

CAMPINAS (SP). *Resolução Conjunta nº 09, de 31 de julho de 2014.* Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para o reúso direto não potável de água provenientes de estações de tratamento de esgoto para fins de usos múltiplos no município de Campinas. Campinas, 31 jul. 2014. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/alocacao-de-agua/oficina-escassez-hidrica/legislacao-sobre-escassez-hidrica/sao-paulo/resolucao-conjunta-no-09-2014. Acesso em: 24 de fevereiro de 2026.

CERH-MG. Conselho Estadual de Recurso Hídricos de Minas Gerais (2020). Deliberação normativa CERH-MG n° 65, de 18 de junho de 2020. Disponível em:< http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=52040>. Acesso em: 13 abr. 2026.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Reúso de água*. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/agua/reuso-de-agua/. Acesso em: 17 abr. 2026

CUNHA, A.P.M.A.; ALVALA, R.C.S.; NOBRE, C.A.; CARVALHO, M.A. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian Semiarid Region.
Cutrovo, J. A. (2015) Potable water reuse history and a new framework for decision making. International Journal of Water Resources Development, 32(4), 1-11.

DARONCO, G. C. Evolução histórica da legislação brasileira no tratamento dos recursos hídricos: das primeiras legislações até a Constituição Federal de 1988. Porto Alegre: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Anais... 2013. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/2138e9424748a787dc20c5aec625a25c_49028a51492e0183072f8d38ac42dbc6.pdf> . Acesso em 24 de fevereiro de 2026.

Dingemans, M. M. L., Smeets, P.W M. H., Medema, G., Frijns, J., Raat, K. J., van Wezel, A. P., Bartholomeus, R. P. (2020) Responsible Water Reuse Needs an Interdisciplinary Approach to Balance Risks and Benefits. Water, 12.

FERREIRA, Ana Paula Thomazelli; OLDEMBURG, Carla Helena; COSTA, Carolina Ferreira da; TAVARES, Renata; ZANZINI, Julio César. Tratamento de efluentes para reúso industrial: o Projeto Aquapolo. In: ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 20., 2018, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ENGEMA, 2018.

FILHO, José Lavrador. Contribuição para o entendimento do reúso planejado da água e algumas considerações sobre suas possibilidades no Brasil 1987. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/000743999. Acesso em: 19 de fev. 2026.

FLORENCIO, L; BASTOS, R. K. X; AISSE, M. M. (coordenador). Tratamento e utilização de esgotos Sanitários. PROSAB –Edital IV. Recife: ABES, 2006. 427p.

FREITAS, Vladimir Passos. Águas: aspectos jurídicos e ambientais. Curitiba, Juruá, 2007

GIAKOUMIS, T., VAGHELA, C. VOLVOULIS, N. (2020) The role of water reuse in the circular economy. Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection, 5, 227-252.

GONÇALVES, Monize Karen Sant Ana. A responsabilidade júridica pela má utilização da água. Disponível em: < https://jus.com.br/artigos/52385/aresponsabilidade-juridica-pela-ma-utilizacao-da-agua> Acesso em: 16 de set de 2026.

HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 8, n. 3, p. 139-147, 2003.

IANAS—Inter-American Network of Academies of Sciences. Water Quality in the Americas: Risks and Opportunities. México. 2019.

INTERÁGUAS (Programa de Desenvolvimento do Setor Água). Elaboração de proposta do plano de ação para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil: Produto IV – avaliação do potencial de reúso (RP01C). Brasília, DF: CH2M, 2017. 294 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Mapa de clima do Brasil. 2002. Disponível em: <http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf> . Acesso em 24 de fevereiro de 2026.

LIMA, S.C.A.; SANTOS, C.A.B. EDUCAÇÃO E SAÚDE PÚBLICA: DETERMINAÇÃO DE CLORO E *ESCHERICHIA COLI*, NA ÁGUA UTILIZADA PARA CONSUMO NO IFPE, *CAMPUS* AFOGADOS DA INGAZEIRA. Revista Ouricuri, v.6, n.2, p.029-041. mai./ago., 2016.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reúso de Água. 2. ed. Barueri: Manole, 2017.

MARENGO, J. A.; DIAS, P. L. S.; Águas Doces no Brasil, Capital Ecológico, Uso e Conservação; 4ª Edição; Cap. 3 – Mudanças Climáticas e seus Impactos Climáticos e Hidrológicos no Brasil; Pg. 63 – 92; Editora Escrituras; São Paulo; 2015.

MARIN, P., TAL, S., YERES, J., KLAS, R. Water Management in Israel: Key Innovations and Lessons Learned for Water Scarce Countries. Banco Mundial, Washington, DC. 2017.

me

MENDONÇA, F.; SANTOS, L. J. C. Gestão da água e dos recursos hídricos no Brasil: avanços e desafios a partir das bacias hidrográficas – uma abordagem geográfica. Geografia. V.31, n.1, p. 103 – 117, jan./abr. 2006.

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

MEYER, S.T. O Uso de Cloro na Desinfecção de Águas, a Formação de Trihalometanos e os Riscos Potenciais à Saúde Pública. Cad. Saúde Públ., Rio de Janeiro, 10 (1): 99-110, jan/mar, 1994.

Moreira, F.d.S.; Lopes, M.P.C.; De Freitas, M.A.V.; Antunes, A.M.d.S. Future scenarios for the development of the desalination industry in contexts of water scarcity: A Brazilian case study. Technol. Forecast. Soc. Chang. 2021, 167, 120727

Moura, P. G., Aranha, F. N., Handam, N. B., Martin, L. E., Salles, M. J., Carvajal, E., Jardim, R., Sotero-Martins, A. (2020) Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental, 25(6), 791-808.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 20 de abr de 2026.

PROLAGOS. (2015) Estação de tratamento de Água de Reúso (ETAR). Disponível em: . Acesso em: abril. 2026.

REBOLÇAS. A. C.; Águas Doces no Brasil, Capital Ecológico, Uso e Conservação; 4ª Edição; Cap. 1 – Água Doce no Mundo e no Brasil; Pg. 1 – 36; Editora Escrituras; São Paulo; 2015.

SACHS, Ignacy. Rumo à ecossocioeconomia: teoria e prática do desenvolvimento. São Paulo: Cortez, 2007.

SALATI, E.; MATTOS DE LEMOS, H.; SALATI, E; Águas Doces no Brasil, Capital Ecológico, Uso e Conservação; 4ª Edição; Cap. 2 – Água e o Desenvolvimento Sustentável; Pg. 37 – 62; Editora Escrituras; São Paulo; 2015.

SNIS—Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. Brasília. 2019

Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 ed Washington, D.C.: American Public Health Association. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Agua, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos. CETESB – ANA 2011. ABNT/NBR 9898/87.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – SUDENE. Delimitação do semi-árido. 2017. Disponível em: <http://www.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido> . Acesso em: 24 de fev de 2026.

TARGA, M. S.; BATISTA, G. T. Benefits and legacy of the water crisis in Brazil. Rev. Ambient. Água, v. 10, n. 2, p. 234-239, 2015.

TSAGARAKIS, K.P.; MENEGAKI, A.N.; SIARAPI, K.; ZACHAROPOULOU, F. Safe alerts reduce willingness to visit park irrigated whit recycled water. Journal of risk research, v. 16, n. 2, 2013.

TZANAKAKIS, V.A.; PARANYCHIANAKIS, N.V.; LONDRA, P.A.; ANGELAKIS, A.N. Effluent application to the land: Changes in soil proprieties and treatment potential. Ecological Engineering, v. 37, n. 11, p. 1757-1764. 2011.

UBERABA. Prefeitura Municipal. Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Turismo. Uberaba em dados. Uberaba, 2008. Disponível em: < https://pt.slideshare.net/prefeituradeuberaba/uberaba-em-dados-17>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2026.

UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND; WORLD HEALTH ORGANIZATION. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene: special focus on inequalities. New York: UNICEF/ WHO, 2019. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/329370/9789241516235-eng.pdf?ua=1> . Acesso em 24 de fev de 2026.

VASCONCELOS, Jose Wilamy Carneiro. A crise hídrica brasileira: água um bem precioso. Disponível em: < https://jus.com.br/artigos/39802/a-crise-hidrica-brasileiraagua-um-bem-precioso> Acesso em: 02 abr de set de 2026.