



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL



Jamilly Moreira Gomes

Avaliação da qualidade da água e da estabilidade química na
rede de distribuição do *campus* Morro do Cruzeiro da
Universidade Federal de Ouro Preto – Minas Gerais

Ouro Preto

2026

Jamilly Moreira Gomes

Avaliação da qualidade da água e da estabilidade química na
rede de distribuição do *campus* Morro do Cruzeiro da
Universidade Federal de Ouro Preto – Minas Gerais

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso
de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de
Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Dr.Aníbal da Fonseca Santiago

Coorientadora: Dra.Grazielle Rocha dos Santos

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633a Gomes, Jamilly Moreira.

Avaliação da qualidade da água e da estabilidade química na rede de distribuição do campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto - Minas Gerais. [manuscrito] / Jamilly Moreira Gomes. - 2026. 56 f.: il.: color., tab.. + Quadros.

Orientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago.

Coorientadora: Profa. Dra. Grazielle Rocha dos Santos.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Água - Qualidade. 2. Segurança Hídrica. 3. Corrosão. I. Santiago, Aníbal da Fonseca. II. Santos, Grazielle Rocha dos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 556

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jamilly Moreira Gomes

Avaliação da Qualidade da Água e da Estabilidade Química na Rede de Distribuição do *Campus* Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto – Minas Gerais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Aprovada em 29 de maio de 2026

Membros da banca

Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Grazielle Rocha dos Santos - Coorientadora - Universidade Estadual de Minas Gerais
Dr. Maria Célia da Silva Lanna - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes - Universidade Federal de Ouro Preto

Aníbal da Fonseca Santiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/06/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Anibal da Fonseca Santiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/06/2026, às 16:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1120313** e o código CRC **3026E312**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que me manteve firme diante de todos os desafios encontrados ao longo desta caminhada. Foi Ele quem esteve ao meu lado nos dias em que o cansaço parecia maior que qualquer obstáculo, me dando força, coragem e perseverança para continuar.

À minha mãe, Vera, expresso minha mais profunda gratidão por todas as orações, pelo incentivo constante e por todo amor e apoio dedicados a mim. Aos meus irmãos, Joyce e Júnior, e aos meus sobrinhos, João Lucas e Helena, agradeço o carinho, compreensão e apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu namorado, agradeço pelo incentivo, pela paciência e por nunca medir esforços para me ajudar durante essa trajetória.

Ao meu orientador, Aníbal da Fonseca Santiago, sou extremamente grata por todo o acompanhamento acadêmico, pela dedicação, pelos ensinamentos compartilhados e pela condução leve e enriquecedora desta etapa tão importante.

À minha coorientadora, Grazielle Rocha dos Santos, agradeço por despertar em mim o interesse pela pesquisa nesta área. Sua orientação, seus ensinamentos constantes e sua leveza foram essenciais para que este trabalho se desenvolvesse da melhor forma possível, desde o início até sua conclusão.

À Universidade Federal de Ouro Preto, em especial à PRECAM, por possibilitarem a realização desta pesquisa no Campus Morro do Cruzeiro.

Por fim, este Trabalho de Conclusão de Curso representa o encerramento de uma importante etapa acadêmica, marcada por muito aprendizado, dedicação e crescimento pessoal. Mais do que um fim, ele simboliza o início de novos desafios e grandes conquistas que ainda estão por vir.

RESUMO

A garantia da qualidade da água para consumo humano depende não apenas da eficiência do tratamento, mas também da integridade física e operacional do sistema de distribuição. Este estudo objetivou avaliar a qualidade da água e as condições da rede de distribuição do Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com captação subterrânea e desinfecção por cloração. Foram realizadas análises microbiológicas, físico-químicas e de metais ao longo do ano de 2024 em nove pontos de amostragem, incluindo a saída do tratamento e pontos estratégicos da rede. Os resultados indicaram conformidade microbiológica e concentrações de metais dentro dos Valores Máximos Permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Contudo, observou-se elevada incidência de não conformidades no parâmetro cor, especialmente em pontos precedidos por tubulações metálicas. O Índice de Saturação de Langelier indicou uma tendência corrosiva da água, resultado que corrobora as evidências físicas de degradação observadas nas tubulações. A elevação da cor após períodos de baixo consumo reforça a influência do tempo de detenção hidráulica na mobilização de produtos de corrosão. Observa-se que, embora o sistema sugere segurança sanitária imediata, a infraestrutura da rede de distribuição configura-se como o principal fator limitante para a manutenção da potabilidade, demandando intervenções estruturais e monitoramento contínuo para assegurar a segurança hídrica da comunidade acadêmica.

Palavras-chaves: Qualidade da água. Rede de distribuição. Segurança hídrica. Corrosão. Índice de Langelier.

ABSTRACT

The assurance of drinking water quality depends not only on the efficiency of the treatment process but also on the physical and operational integrity of the distribution system. This study aimed to evaluate the water quality and the conditions of the distribution network at the Morro do Cruzeiro Campus of the Federal University of Ouro Preto (UFOP), with groundwater abstraction and chlorination disinfection. Microbiological, physicochemical, and metal analyses were carried out throughout 2024 at nine sampling points, including the treatment outlet and strategic points within the network. The results indicated microbiological compliance and metal concentrations within the Maximum Permitted Values (VMP) established by Ordinance GM/MS No. 888/2021. However, a high incidence of non-compliance was observed for the color parameter, especially at points preceded by metallic pipelines. The Langelier Saturation Index indicated a corrosive tendency of the water, a result that corroborates the physical evidence of degradation observed in the pipelines. The increase in color after periods of low consumption reinforces the influence of hydraulic detention time on the mobilization of corrosion byproducts. It is observed that, although the system suggests immediate sanitary safety, the distribution network infrastructure constitutes the main limiting factor for maintaining potability, requiring structural interventions and continuous monitoring to ensure the water safety of the academic community.

Keywords: Water quality. Distribution network. Water security. Corrosion. Langelier Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pontos de amostragem no campus Morro do Cruzeiro.	23
Figura 2 - Resultados das análises de cloro, turbidez, cor e pH mensurados semanalmente na saída do tratamento (P0).	32
Figura 3 - Resultados das análises de cloro, turbidez, cor e pH mensurados semanalmente no RU (P1).	33
Figura 4 - Resultados das análises de cloro, turbidez, cor e pH mensurados semanalmente no Centro de Convergência (P2).	34
Figura 5 - Resultados das análises de cloro, turbidez, cor e pH mensurados semanalmente no ICEB (P3).	35
Figura 6 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente no alojamento (P4).	36
Figura 7 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente na prefeitura (P5).	37
Figura 8 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente no posto de saúde (P6).	38
Figura 9 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente no centro de ciência animal (P7).	39
Figura 10 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente na Escola de Minas (P8).	40
Figura 11 - Tubulação de recalque de corrosões acentuadas.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado das análises microbiológicas realizadas nos pontos de amostragens no Campus Morro do Cruzeiro.....	30
Tabela 2 - Conformidade das análises de metais e metaloides realizadas nos pontos de amostragens no Campus Morro do Cruzeiro.....	42
Tabela 3 - Resultado das análises da água bruta e tratada na saída do tratamento realizadas no multiparâmetros.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Equipamentos portáteis utilizados para medir variáveis físicas e químicas da água in loco.....	24
Quadro 2 - Parâmetros de metais estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.	24
Quadro 3 - Periodicidade de análise estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. .	25
Quadro 4 - Características dos poços tubulares que abastecem a comunidade acadêmica.	27

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO GERAL	15
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	16
3.2	ABASTECIMENTO DE ÁGUA	17
3.3	HISTÓRICO DA POTABILIDADE	18
3.4	ESTABILIDADE QUÍMICA	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	AREA DE ESTUDO	22
4.2	PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	22
4.3	ANÁLISE MICROBIOLÓGICA.....	23
4.4	ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICAS	23
4.5	TEOR DE METAIS	24
4.6	PERIODICIDADE DAS ANÁLISES.....	24
4.7	ÍNDICE DE LANGELIER.....	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	27
5.2	PARAMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA	29
5.3	ANÁLISE DE METAIS	42
5.4	INDICE DE SATURAÇÃO DE LANGELIER	44
6	CONCLUSÃO	48

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....48

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água doce, limpa e em quantidade suficiente é necessária para a sobrevivência de todos os seres vivos, além de ser fundamental para o equilíbrio dos ecossistemas, o bem-estar das comunidades e o desenvolvimento das economias. Em razão, principalmente, do crescimento acelerado da população o acesso à água de qualidade tem se tornado uma preocupação crescente para a sociedade (BAZÍLIO, 2023). Segundo a Organização das Nações Unidas cerca de 3,4 bilhões de pessoas não tem acesso à serviços de saneamento básico seguro, sendo que desses 2,1 bilhões carecem de acesso a água potável (WHO; UNICEF, 2025).

De acordo com dados do Ministério das Cidades (2026) no país cerca de 15% da população não tem acesso a uma água segura para consumo, representando cerca de 3 milhões de brasileiros. Entretanto a demanda por água cresce de forma vertiginosa, e, de acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA) (2019), projeta-se um aumento de 24% nos próximos 20 anos. Entre os principais fatores que impulsionam essa crescente necessidade estão a alta densidade populacional, o avanço da urbanização e o desenvolvimento econômico. Apesar de o país deter uma das maiores disponibilidades hídricas do mundo, abrigando a maior bacia hidrográfica e o maior aquífero em seu território, a preservação desses recursos enfrenta desafios significativos devido à infraestrutura deficiente de saneamento básico, que compromete a qualidade e a segurança do abastecimento de água (MUREI et al., 2022).

O saneamento básico no país é instituído pela Lei nº 11.445/07, atualizada pela Lei nº 14.026/20, onde define o conceito de saneamento básico como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais relacionados a quatro pilares fundamentais que são: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (BRASIL, 2007). No tocante especificamente ao abastecimento de água, a garantia da qualidade da água e segurança aos usuários é regulamentada pela Portaria GM/MS nº 888/21, que estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano, definindo padrões microbiológicos, físicos e químicos a serem atendidos pelos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) e pelas Soluções Alternativas Coletivas (SAC) (BRASIL, 2021).

Świetlik e Magnucka (2023) são categóricos aos destacar que falhas operacionais ou estruturais, especialmente na reservação e na rede de distribuição, podem comprometer a qualidade da água tratada, mesmo quando a fonte e o tratamento são adequados, evidenciando a importância do monitoramento contínuo de todo o sistema de abastecimento. Sendo fatores

como o traçado da rede, o tempo de detenção nos reservatórios e a integridade das tubulações determinantes para a manutenção da potabilidade. O traçado da rede pode influenciar na distribuição e mudança na concentração de cloro residual, ao passo que o tempo que a água se mantém nos reservatórios também afeta. Por fim falhas na integridade das tubulações também podem contribuir em alterações na qualidade da água, através de infiltração de contaminantes, tornando indispensável a manutenção contínua do sistema para evitar riscos à saúde pública (RICHTER, 2009).

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o sistema de abastecimento de água do *Campus* Morro do Cruzeiro da UFOP, por meio da caracterização das suas estruturas físicas e operacionais, associada à análise de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da água distribuída para compreender como as características podem influenciar a qualidade da água fornecida e identificar fatores estruturais e operacionais que possam comprometer o seu desempenho.

2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade da água e a estabilidade química na rede de distribuição do *Campus* Morro do Cruzeiro da UFOP, por meio da caracterização do sistema e do monitoramento dos parâmetros de potabilidade, visando identificar possíveis alterações e propor medidas de adequação às normas vigentes.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar o sistema de captação e distribuição da água, incluindo seus aspectos estruturais;
- ✓ Avaliar a qualidade da água de abastecimento do *Campus* Morro do Cruzeiro, com base nos parâmetros estabelecidos pela legislação de potabilidade vigente;
- ✓ Identificar não conformidade e pontos de vulnerabilidade do sistema de distribuição de água do *Campus* Morro do Cruzeiro;
- ✓ Correlacionar as condições da rede com os resultados das análises de qualidade da água obtidos;
- ✓ Propor medidas de melhoria e otimização para o sistema de abastecimento de água, visando o aprimoramento da qualidade da água distribuída e da eficiência operacional do sistema.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas subterrâneas representam um dos principais componentes do ciclo hidrológico e constituem uma reserva de água doce para abastecimento humano, agrícola e industrial. Estudos recentes destacam que esse recurso é importante para a segurança hídrica global, especialmente em regiões sujeitas à escassez de água superficial (PEREIRA; ABREU; MURILLO-BERMUDEZ, 2023).

Neste contexto, a hidrogeologia configura-se como ciência responsável pelo estudo da ocorrência, circulação e qualidade das águas subterrâneas. Segundo Uliana (2025), essa área integra fundamentos de geologia, física, matemática e química, permitindo a compreensão dos processos que controlam o fluxo subterrâneo e sua interação com o meio geológico.

Os aquíferos, por sua vez, são formações geológicas com capacidade de armazenamento e transmissão de água, constituídos por materiais que apresentam poros ou fraturas saturadas. De acordo com o LibreTexts (2024), a capacidade de armazenamento está diretamente associada à porosidade do meio, enquanto o movimento da água depende da permeabilidade. Logo, um aquífero eficiente combina elevada porosidade e permeabilidade, permitindo tanto o acúmulo quanto a circulação hídrica.

No que se refere ao escoamento subterrâneo, este é regido por princípios físicos, com destaque para a Lei de Darcy, amplamente utilizada para descrever o fluxo em meios porosos. Conforme Uliana (2025), esse processo depende do gradiente hidráulico e das propriedades do meio, sendo fundamental para compreender tanto a disponibilidade hídrica quanto o transporte de contaminantes no subsolo.

A composição hidrogeoquímica das águas subterrâneas é determinada pela interação água-rocha ao longo do tempo. Esse processo controla a presença de íons dissolvidos, refletindo a litologia do aquífero e o tempo de residência da água. Dessa forma, a hidroquímica é um dos principais indicadores das características naturais das águas subterrâneas (Ma *et al.*, 2023).

As águas subterrâneas podem ser classificadas conforme o regime de pressão em que se encontram no subsolo. Elas podem ser divididas em freáticas, quando ocorrem em aquíferos livres sob pressão atmosférica, ou artesianas, quando estão associadas a aquíferos confinados sob pressão superior à atmosférica (SGB, 2026).

A qualidade da água subterrânea não é algo estático, pois sofre alterações contínuas ao longo do fluxo subterrâneo. Segundo Abanyie *et al.* (2023), fatores naturais e antrópicos influenciam diretamente essa evolução hidrogeoquímica, incluindo clima, características

geológicas e litológicas, interação água–rocha, tempo de residência da água e atividades humanas. Os autores destacam que processos hidrogeoquímicos, como dissolução mineral e intemperismo, exercem importante influência sobre a composição das águas subterrâneas.

Por fim, antes de atingir o aquífero, a água infiltrada e os possíveis contaminantes precisam atravessar a zona não saturada. Conforme Dahan (2020), é nessa camada superficial que ocorrem processos naturais de retenção e degradação de poluentes, funcionando como uma barreira protetora que reduz o impacto das atividades humanas.

3.2 ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O abastecimento de água constitui um dos pilares fundamentais do saneamento básico, sendo importante para a promoção da saúde pública, a qualidade de vida e o desenvolvimento socioeconômico, uma vez que o acesso à água potável em quantidade suficiente e qualidade dentro dos padrões está diretamente associado à prevenção de doenças e à melhoria das condições de vida das populações (OMS, 2022; HELLER; PÁDUA, 2010).

No contexto brasileiro, a Lei nº 11.445/2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, define o abastecimento de água como um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais que abrangem desde a captação até a distribuição de água potável aos usuários, evidenciando seu papel estruturante dentro do setor (BRASIL, 2007).

A Lei nº 14.026/2020 atualizou o marco regulatório do setor ao alterar a Lei nº 11.445/2007, promovendo a regionalização dos serviços e ampliando a participação do setor privado como estratégias para aumentar a eficiência e atrair investimentos. Nesse contexto, tais medidas buscam acelerar a universalização do saneamento básico no país até 2033, conforme metas estabelecidas na legislação brasileira (BRASIL, 2020).

Segundo o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico, o déficit de saneamento básico no Brasil ainda é expressivo e evidencia profundas desigualdades no acesso aos serviços essenciais, com cerca de 15,9% dos brasileiros sem acesso à água potável e mais de 37% sem coleta de esgoto, além de apenas aproximadamente 48% do esgoto gerado receber tratamento (BRASIL, 2024).

Diante desse cenário, a infraestrutura de fornecimento de água adequa-se a diferentes realidades demográficas e geográficas (HELLER; PÁDUA, 2010). Para fins de controle e monitoramento sanitário, a Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde classifica as formas de abastecimento em três modalidades principais. O atendimento pode ocorrer por meio de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), caracterizados por instalações coletivas

operadas com rede de distribuição ou por meio de Soluções Alternativas de Abastecimento, que não possuem rede de distribuição e se subdividem em Coletivas (SAC), quando destinadas ao fornecimento simultâneo a vários usuários, e Individuais (SAI), quando atendem a núcleos unifamiliares (BRASIL, 2021).

O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) representa a infraestrutura convencional e de maior complexidade, sendo a solução prioritária para áreas urbanas e de adensamento populacional. Caracteriza-se pela operação contínua e por englobar desde a captação e o tratamento até a rede de distribuição. (BRASIL, 2021). Por atender a uma coletividade extensa, a gestão do SAA é tipicamente exercida por prestadores de serviço público ou concessionárias, conforme estabelece a legislação nacional de saneamento básico (BRASIL, 2007), exigindo um rigoroso e frequente monitoramento operacional dos parâmetros de potabilidade e da estabilidade do cloro residual ao longo das tubulações (BRASIL, 2021).

Em contrapartida, o uso de soluções isoladas é implementado em locais onde a extensão de uma rede de distribuição convencional é técnica ou economicamente inviável (HELLER; PÁDUA, 2010). Do ponto de vista normativo, essas estruturas são classificadas como Solução Alternativa Coletiva (SAC), atendendo a múltiplos usuários simultaneamente. Embora não possua uma rede de distribuição extensa, a SAC requer infraestrutura de captação e exige um responsável técnico para garantir a manutenção do sistema e a desinfecção obrigatória da água, assegurando a proteção sanitária da comunidade atendida (BRASIL, 2021).

Por fim, a Solução Alternativa Individual (SAI) configura-se como a modalidade de menor escala, destinada exclusivamente ao atendimento de núcleos unifamiliares. Geralmente materializada por meio de poços freáticos, poços tubulares profundos ou captação de nascentes, a SAI apresenta um desafio crítico de gestão de risco. (BRASIL, 2019). Nessas soluções, a responsabilidade pela proteção do manancial e pela manutenção da qualidade da água recai sobre o próprio usuário (BRASIL, 2021).

3.3 HISTÓRICO DA POTABILIDADE

A definição de água potável no Brasil é estabelecida pelo Ministério da Saúde como aquela que atende aos padrões de potabilidade e não oferece riscos à saúde (Brasil, 2021). O país adota o critério de Valores Máximos Permitidos (VMP), que correspondem aos limites de tolerância para componentes químicos, físicos e biológicos presentes na água, conforme os padrões de aceitabilidade e proteção à saúde (Libânio, 2010). Segundo a Portaria GM/MS nº 888, de 2021, caso uma amostra ultrapasse esses limites, a água é considerada imprópria para o consumo humano, sendo necessárias ações corretivas. Esse controle evoluiu de parâmetros

iniciais estabelecidos em 1977 para a norma atualmente vigente, consolidando-se como o principal instrumento regulatório para garantir a segurança hídrica nos pontos de consumo (Brasil, 2021; Libânio, 2010).

O estabelecimento dos VMP, baseia-se no conceito de risco aceitável, uma vez que a água potável segura é definida como aquela que não representa risco significativo à saúde ao longo da vida de consumo (WHO, 2022). Reconhece-se que a potabilidade não implica na ausência absoluta de substâncias, mas na manutenção de concentrações que não causem efeitos adversos à saúde após exposição prolongada (Heller; Pádua, 2006). Dessa forma, o VMP funciona como uma margem de segurança sanitária, ainda que existam elementos residuais na água, os limites normativos garantem que a probabilidade de toxicidade crônica ou de surtos epidemiológicos seja minimizada a níveis desprezíveis para a população (Libânio, 2010).

A segurança da água para consumo humano é mantida por meio de revisões constantes das diretrizes, permitindo a incorporação de novas evidências científicas e a atualização dos valores de referência com base em avaliações de risco à saúde, em consonância com os objetivos de proteção da saúde pública (WHO, 2022).

A evolução da legislação de potabilidade no Brasil está associada à crescente necessidade de proteção da saúde pública e dos recursos hídricos, reconhecidos como essenciais e finitos (BITTENCOURT, 2015). Em 1977, consolidou-se um marco inicial na regulamentação da potabilidade da água no Brasil, por meio do Decreto nº 79.367, que determinou que o Ministério da Saúde seria responsável pela elaboração das normas e pelo estabelecimento dos padrões de potabilidade (BRASIL, 1977, art. 1º). Logo em seguida, foi publicada a Portaria nº 56/BSB, em cumprimento ao Decreto nº 79.367, estabelecendo o primeiro padrão nacional de potabilidade da água para consumo humano no Brasil (BRASIL, 2014).

A literatura indica que, com o avanço das ciências sanitárias e das evidências epidemiológicas, houve a incorporação progressiva de normativas voltadas ao controle e monitoramento da qualidade da água (WHO, 2022; BRASIL, 2021). Nesse processo evolutivo, destaca-se a Portaria nº 1.469/2000, que atualizou os critérios de qualidade e reforçou a vigilância sanitária, sendo posteriormente substituída pela Portaria nº 518/2004 (BRASIL, 2000; BRASIL, 2004).

Em seguida, a Portaria nº 2.914/2011 consolidou e ampliou esses avanços ao estabelecer procedimentos mais detalhados de controle e monitoramento (BRASIL, 2011). Esse processo culminou na Portaria de Consolidação nº 5/2017, que sistematizou as normas

existentes, sendo posteriormente atualizada pela Portaria GM/MS nº 888/2021, atualmente vigente, alinhada às diretrizes da Organização Mundial da Saúde (BRASIL, 2017; WHO, 2022).

A Portaria GM/MS nº 888 de 2021 consolidou o modelo vigente ao ampliar o monitoramento de substâncias químicas e de alguns contaminantes emergentes (Brasil, 2021). Essa atualização busca atender ao que propõe Marcos von Sperling, ao utilizar padrões de qualidade como instrumentos legais para assegurar que a água distribuída não represente riscos à saúde (SPERLING, 1996), acompanhando a tendência de adotar valores máximos permitidos mais restritivos e reforçar a vigilância (WHO, 2022). Além disso, a norma incorpora uma abordagem baseada em risco e fortalece o controle operacional ao longo de todo o sistema de abastecimento, desde a captação até a distribuição, ampliando as responsabilidades dos prestadores de serviço e das autoridades de vigilância (BRASIL, 2021).

3.4 ESTABILIDADE QUÍMICA

A estabilidade química da água refere-se ao equilíbrio entre pH, alcalinidade, dureza e sais dissolvidos, evitando processos de corrosão e incrustação nas tubulações. Essa condição influencia diretamente a qualidade da água distribuída e a preservação dos sistemas de abastecimento, uma vez que tais parâmetros estão relacionados à formação de incrustações e processos corrosivos (SOUZA et al., 2020).

Essa estabilidade exerce influência direta nos processos de tratamento da água, especialmente na desinfecção. A Organização Mundial da Saúde destaca que variações no pH podem reduzir significativamente a eficiência da desinfecção, principalmente quando o cloro é utilizado como agente desinfetante (WHO, 2022).

No sistema de distribuição, a instabilidade química da água pode causar problemas como corrosão de tubulações e dissolução de metais pesados. A United States Environmental Protection Agency ressalta que águas com baixa alcalinidade ou pH desbalanceado tendem a ser corrosivas, comprometendo a integridade da infraestrutura e favorecendo a liberação de metais para a água (EPA, 2016). A Organização Mundial da Saúde também aponta que o controle da estabilidade da água é necessário para evitar a contaminação da água durante sua distribuição até o consumidor final (WHO, 2022).

Os índices de estabilidade da água, como o Índice de Saturação de Langelier (LSI), são muito utilizados para avaliar o potencial corrosivo ou incrustante da água em sistemas de distribuição. Esses índices permitem prever tendências de corrosão e deposição mineral,

auxiliando no controle operacional e na proteção das redes de abastecimento (OLUKOYA et al., 2022).

Além do comprometimento estrutural das redes de distribuição, a instabilidade química da água acarreta também implicações de saúde pública. Quando o Índice de Saturação de Langelier aponta para uma tendência corrosiva, ocorre a aceleração da degradação de tubulações metálicas, o que eleva a taxa de desprendimento e dissolução desses materiais na água tratada, podendo ultrapassar os limites regulamentares de potabilidade e expor os consumidores a riscos nocivos a saúde (KELLNER; OLIVEIRA, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 AREA DE ESTUDO

Esta pesquisa foi desenvolvida no *Campus* Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), localizado no município de Ouro Preto, Minas Gerais. O *campus* é abastecido por um sistema próprio de captação, tratamento, reservação e distribuição de água, destinado ao atendimento da comunidade acadêmica.

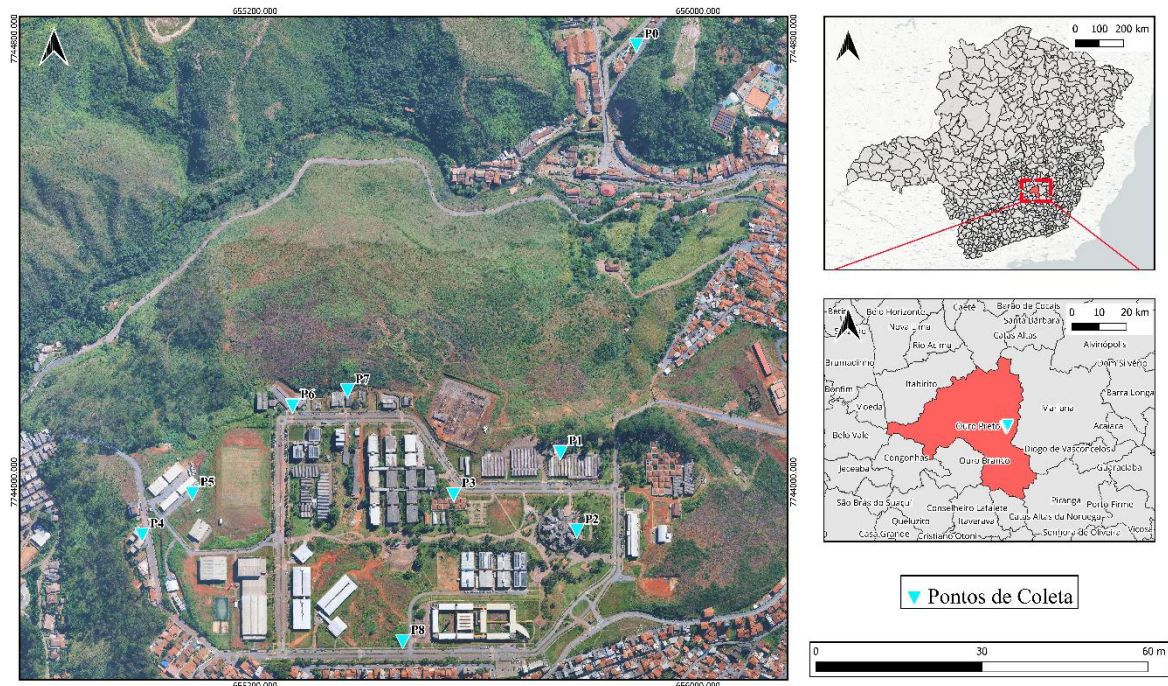
A captação da água é realizada por meio de poços no Centro de Convenções da UFOP, onde se encontram os reservatórios iniciais e é realizado o tratamento. Posteriormente, a água é bombeada para um reservatório, no *Campus* Morro do Cruzeiro, responsável por distribuí-la para todo o *campus*.

4.2 PONTOS DE AMOSTRAGEM

A Portaria GM/MS nº 888/2021 define, em seu Anexo XV, o plano mínimo de amostragem para o controle da qualidade da água. Especificamente o número mínimo de pontos de coleta e a frequência de monitoramento é em função do tipo de manancial e da população atendida. De acordo com esse anexo, para captações subterrâneas, deve ser monitorado um ponto na rede de distribuição para cada 1.000 habitantes abastecidos, considerando pontos representativos do consumo humano.

Considerando que a comunidade acadêmica do *Campus* Morro do Cruzeiro é composta por aproximadamente 8.000 pessoas, foram avaliados oito pontos estrategicamente distribuídos nos principais prédios da UFOP. Este tipo de captação tem a obrigatoriedade de mensuração dos seguintes parâmetros: coliformes termotolerantes, cor aparente, cloro residual, pH e turbidez. Esse estudo realizou essas análises entre janeiro e dezembro de 2024.

Figura 1- Pontos de amostragem no campus Morro do Cruzeiro.



Fonte: Autora, 2026.

4.3 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

Para a determinação do parâmetro microbiológico, foram realizadas análises de coliformes totais e *Escherichia coli*, utilizando-se o método do substrato cromogênico por meio do reagente Colilert®. As amostras de água foram coletadas em frascos de polietileno devidamente esterilizados e acondicionadas, conforme as recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), de modo a garantir a integridade microbiológica até o momento das análises.

A análise microbiológica foi conduzida apenas pelo método qualitativo, uma vez que a água avaliada é destinada ao consumo humano e de acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, não é permitida a presença de *Escherichia coli* em amostras de água potável, sendo a mínima detecção desses microrganismos suficiente para caracterizar a não conformidade. Dessa forma, a realização de análises quantitativas torna-se desnecessária, visto que qualquer ocorrência já traz o comprometimento da potabilidade da água.

4.4 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICAS

Para a realização das análises físicas e químicas da água, foram utilizados equipamentos portáteis, conforme apresentados no Quadro 1, permitindo a determinação dos parâmetros diretamente *in loco*, de modo a minimizar alterações nas características das amostras e garantir maior representatividade dos resultados obtidos.

Quadro 1 - Equipamentos portáteis utilizados para medir variáveis físicas e químicas da água in loco.

Equipamento utilizado	Variável	Faixa de detecção
Colorímetro Digimed DM-COR	Cor	0 a 500 Pçt-Co
Turbidímetro portátil 2100Q marca Hach ®	Turbidez	0 a 100 Ut
pHmetro : eletrodo PHC101 Hach ®	pH	-
Pocket Colorimeter II Hach ®	Cloro residual	0,02 – 8,0 mg/L Cl ₂

Adicionalmente, a condutividade elétrica da água foi determinada em laboratório por meio de condutivímetro, o qual permite avaliar a concentração de íons dissolvidos presentes na amostra. Embora a Portaria GM/MS nº 888/2021 não estabeleça valor máximo permitido para esse parâmetro, seu monitoramento é importante para garantir a estabilidade da qualidade da água ao longo do sistema.

4.5 TEOR DE METAIS

Para identificação dos metais dissolvidos, as amostras de água foram inicialmente submetidas à filtração em membrana de celulose com porosidade de 0,45 µm e em seguida transferidas para frascos de polietileno de 60 mL. Logo após, foram acidificadas com ácido nítrico ultrapuro 65% (Alphatec®) em pH inferior a 2, com o objetivo de manter os metais em solução, sendo então acondicionadas e preservadas sob refrigeração a 4 °C até o momento das análises, as quais foram realizadas por espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e por espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS).

A avaliação dos resultados obtidos foi realizada por meio da comparação com os valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/21, conforme os parâmetros apresentados na Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros de metais estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Metal (µg/L)	Al	As	Ba	Cd	Pb	Cr	Cu	Fe	Mn	Na	Ni	Se	U	Zi
VMP	200	10	700	3	10	50	2000	300	100	2000	70	40	30	5000

Legenda: Al: Alumínio, As: Arsênio, Ba: Bário, Cd: Cádmio, Pb: Chumbo, Cr: cromo, Cu: Cobre, Fe: Ferro, Mn: manganês, Na: Sódio, Ni: Níquel, Se: Selênio, U: Urânio, Zn: Zinco.

4.6 PERIODICIDADE DAS ANÁLISES

O Quadro 3 mostra a periodicidade das análises estabelecidas pela Portaria GM/MS nº 888/2021 para sistemas de abastecimento de água com captação de águas subterrâneas.

Quadro 3 - Periodicidade de análise estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Parâmetro	Periodicidade
Cloro residual	Semanal
Turbidez	Semanal
Colifomes Totais	Semanal
Escherichia coli	Semanal
Cor	Semanal
pH	Semanal
Condutividade elétrica	Semestral
Substâncias químicas inorgânicas	Semestral na Saída do tratamento e trimestral no sistema de distribuição
Substâncias Orgânicas	Semestral na Saída do tratamento e trimestral no sistema de distribuição
Agrotóxicos e Metabólitos	Semestral na Saída do tratamento e trimestral no sistema de distribuição
Subprodutos da Desinfecção	Bimestral
Organolépticos	Semestral
Avaliação Radiológica	Semestral

*A portaria completa não foi realizada.

4.7 ÍNDICE DE LANGELIER

O Índice de Saturação de Langelier (LSI) é um parâmetro utilizado para avaliar a tendência da água para ser corrosiva ou incrustante, sendo calculado a partir da relação entre o pH real da água (pH_a) e o pH de saturação do carbonato (pH_s). A sua determinação é baseado nos parâmetros: pH_a , temperatura (T), alcalinidade(ALC), dureza cálcica (D) e sólidos totais dissolvidos (STD), uma vez que esses fatores influenciam o equilíbrio químico entre a água e o carbonato de cálcio dissolvido. essa forma, o índice permite identificar se a água possui tendência corrosiva, incrustante ou em equilíbrio químico (LANGELIER,1936).

Foi realizada a análise da alcalinidade conforme metodologia descrita no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), por meio de titulação ácido-base. Primeiramente, a amostra de água foi coletada e armazenada adequadamente para evitar contaminações. Em seguida, 100 mL dessa amostra foi colocado em um erlenmeyer para a execução do experimento.

A titulação foi conduzida utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4), que foi adicionado lentamente até que ocorresse a viragem da cor do indicador, sinalizando o ponto de

equivalência. Com base no volume de ácido consumido, a alcalinidade da água foi calculada e expressa em miligramas por litro (mg/L) de carbonato de cálcio (CaCO_3), utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Alcalinidade} = \frac{\text{Volume do ácido} \times \text{Normalidade} \times 50000}{\text{Volume da amostra}}$$

Após a determinação da alcalinidade, determinou-se a dureza da água, expressa como equivalente em CaCO_3 , permitindo padronizar a contribuição dos íons cálcio e magnésio dissolvidos. Assim, quando esses íons são determinados separadamente, a dureza pode ser calculada pela relação: $\text{Dureza} = 2,497 \times Ca$ conforme descrito por Wilson (2013).

Utilizou-se o multiparâmetros para determinar os sólidos totais dissolvidos, pH da água e a temperatura e então a corrosividade da água pôde-se ser calculada, baseando-se no Índice de Saturação de Langelier, aplicando a fórmula a seguir:

$$pH_s = 9,3 + \left[\frac{\log(STD)-1}{10} \right] + [-13,2 \times \log(T + 273) + 34,55] - [\log(D)] - [\log(ALC)]$$

E então permite-se calcular pela fórmula a seguir o Índice de Langelier:

$$LSI = pH_a - pH_s$$

Caso o resultado seja $LSI=0$, a água está em equilíbrio químico, porém se $LSI>0$ ela tende a ser incrustante e se $LSI<0$, tende a ser corrosiva.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

A captação da água que abastece o campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) é realizada por meio de dois poços tubulares profundos. Esses poços estão localizados no Centro de Convenções da UFOP e constituem as únicas fontes de abastecimento hídrico da unidade. Suas principais características estão descritas no Quadro 4.

Quadro 4 - Características dos poços tubulares que abastecem a comunidade acadêmica.

Atributos	Poço 1	Poço 2
Profundidade	90m	90m
Vazão	6m ³ /h	14m ³ /h
Acionamento	Manual	Automático
Funcionamento	24h/dias alternados	16h/dia
Operação	Desde 1986	Desde 2020

As águas captadas nos poços seguem por meio de tubulações de adução para alguns reservatórios da UFOP localizados no Centro Histórico de Ouro Preto/MG. Sistemas de adução têm a função de transportar água entre estruturas do sistema de abastecimento, sendo dimensionados com base em critérios hidráulicos como vazão, perda de carga e material da tubulação (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015). O poço 1 (P1) abastece o reservatório 1 (R1), construído em concreto armado, com capacidade volumétrica de aproximadamente 9 m³. Já o Poço 2 (P2) alimenta o Reservatório 2 (R2), também em concreto armado, com capacidade de cerca de 300 m³, através de uma tubulação de PVC PBA de 85 mm de diâmetro.

O R1 funciona como reservatório intermediário, possuindo baixa capacidade de armazenamento e pouca elevação. Seu volume é bombeado por uma estação elevatória até o R2, que é responsável pelo abastecimento de água potável do campus Morro do Cruzeiro e, ocasionalmente, do Museu da Escola de Farmácia/LAPAC. Este último, entretanto, é abastecido prioritariamente pela concessionária municipal de água e esgoto, Saneouro, sendo atendido pelo R2 apenas em casos de desabastecimento. O uso de estações elevatórias é comum em sistemas onde as condições topográficas não permitem o escoamento por gravidade, sendo o recalque necessário para garantir níveis adequados de pressão e abastecimento (HELLER; PÁDUA, 2010).

A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece que a água distribuída para consumo humano deve ser submetida à desinfecção e manter concentrações mínimas de desinfetante residual na

rede de abastecimento, visando assegurar a proteção microbiológica da água durante sua distribuição (BRASIL, 2021).

No reservatório R2 possui um sistema de desinfecção que consiste em um dosador de cloro em pastilhas, modelo HTR 6505, fabricado pela empresa Hidro-TR (Brasil). As pastilhas de cloro utilizadas são acondicionadas em embalagens plásticas de 1 kg, distribuídos em cinco pastilhas de 200 gramas cada, com dimensões 7,5 x 2,5 cm (diâmetro x altura), com teor de cloro ativo de 60 a 90%. Adicionalmente, em função do grande volume dos reservatórios, não foi necessária a instalação de tanque de contato, sendo os residuais mínimos de desinfetante garantidos em todo o sistema de distribuição.

A água do R2 é recalçada por uma tubulação de ferro galvanizado classe leve, de 3" de diâmetro e aproximadamente 1.100 m de comprimento, até o Reservatório 3 (R3), localizado no Restaurante Universitário, primeiro ponto de abastecimento. Sistemas de recalque devem ser dimensionados considerando as perdas de carga distribuídas e localizadas, bem como as características do material da tubulação, como a rugosidade, pois esses fatores influenciam diretamente no desempenho hidráulico do sistema (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015).

A partir desse trecho, a tubulação passa a ser de PVC PBA de 85 mm, bifurcando-se em dois ramais principais: um direcionado ao Reservatório 4 (R4), no Centro de Convergência, e outro ao Reservatório 5 (R5), na Escola de Minas. Esses três reservatórios (R3, R4 e R5) constituem os principais pontos de armazenamento do sistema de abastecimento do campus. Na tubulação ainda é feito manobras através da abertura ou fechamento de uma válvula que aumenta ou diminui a vazão de água para os reservatórios R4 e R5, prática usada na operação de redes de distribuição para ajuste hidráulico e controle da vazão e das condições hidráulicas do sistema (CORONADO-HERNÁNDEZ et al., 2024).

A tubulação de recalque possui diversos pontos de corrosão interna e externa. A corrosão externa pode ser devido às características do solo envolta e pela ausência de revestimento de proteção da tubulação, enquanto a corrosão interna é resultado da reação entre os constituintes da água e o material metálico da tubulação (FARH et al., 2023). Em 2020, dois trechos distintos da linha foram substituídos. Intervenções anteriores já haviam sido realizadas em segmentos sob o piso do pátio do Centro de Convenções. Essa tubulação foi instalada há cerca de 20 anos, em substituição a uma anterior que também apresentava corrosão e múltiplos vazamentos. Esse comportamento é consistente com estudos que demonstram que a corrosão interna em tubulações de ferro, resulta da interação entre o material metálico e os constituintes

da água, contribuindo para a degradação estrutural e alterações na qualidade da água (LI et al., 2016).

5.2 PARAMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Na gestão da qualidade da água para consumo humano é importante identificar os perigos e caracterizar os riscos ao longo do sistema de abastecimento, desde a captação até o ponto de consumo, conforme recomendado pelas diretrizes da Organização Mundial da Saúde. Nesse contexto, o perigo é definido como qualquer agente físico, químico ou biológico que possa causar danos à saúde humana, enquanto o risco corresponde à probabilidade de ocorrência desse dano. Assim, no presente estudo, as não conformidades observadas nos parâmetros analisados configuram os perigos associados à qualidade da água, ao passo que a exposição contínua da população ao consumo dessa água representa o risco à saúde, reforçando a importância de ações preventivas e corretivas para a mitigação desses riscos.

Os resultados obtidos para os parâmetros analisados foram em sua maioria dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. As análises realizadas, mostram que a água que provém de captação subterrânea, com o sistema de desinfecção adotado têm sido, em sua maioria, eficazes na manutenção da qualidade da água ao longo da rede. Contudo, observam-se variações pontuais nos parâmetros físico-químicos, o que reafirma a importância do monitoramento constante.

Ao todo, durante o ano de 2024, foram analisadas 289 amostras, considerando todos os pontos definidos no plano de amostragem, nos quais 48,4% apresentaram pelo menos uma não conformidade. É importante destacar que esse resultado foi em sua maioria influenciado pelo parâmetro cor, que apesar de ser reconhecida como um parâmetro predominantemente estético, associado a aceitação pelo consumidor (Addisie, 2022), sua alteração pode influenciar outros parâmetros da potabilidade, como destacado por Heller e Pádua (2010), uma vez que a cor está relacionada à presença de substâncias como matéria orgânica e metais, além de variar em função do pH da água, evidenciando a interdependência entre as características físico-químicas e seu impacto na qualidade da água distribuída.

Em relação às análises microbiológicas, não foi detectada a presença de coliformes totais nem de *Escherichia coli* em nenhuma das amostras analisadas ao longo do período de estudo, como mostra a Tabela 1. Os resultados indicam conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, a qual exige ausência desses microrganismos em amostras de água destinada ao consumo humano (BRASIL, 2021). A avaliação de parâmetros microbiológicos é essencial, uma vez que coliformes totais e

Escherichia coli são amplamente utilizados como indicadores de contaminação fecal e de possível presença de patógenos, representando risco à saúde pública (WHO, 2022).

Tabela 1 - Resultado das análises microbiológicas realizadas nos pontos de amostragens no Campus Morro do Cruzeiro.

	Total de amostra	Coliformes totais	Escherichia coli
Janeiro	22	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Fevereiro	15	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Março	17	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Abril	21	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Maiο	16	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Junho	25	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Julho	34	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Agosto	39	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Setembro	16	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Outubro	35	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Novembro	32	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA
Dezembro	17	AUSÊNCIA	AUSÊNCIA

A ausência desses microrganismos indicadores ao longo do monitoramento indica a eficácia do processo de desinfecção, uma vez que coliformes totais e *Escherichia coli* são utilizados na avaliação da qualidade microbiológica da água e na verificação da segurança sanitária dos sistemas de abastecimento (HELLER; PÁDUA, 2010). Segundo a Organização Mundial da Saúde (2022), a *E. coli* é o indicador preferencial para avaliar a qualidade microbiológica da água, por não se multiplicar na água e ter tempo de sobrevivência curto no ambiente, sua detecção fornece a evidência de contaminação fecal recente.

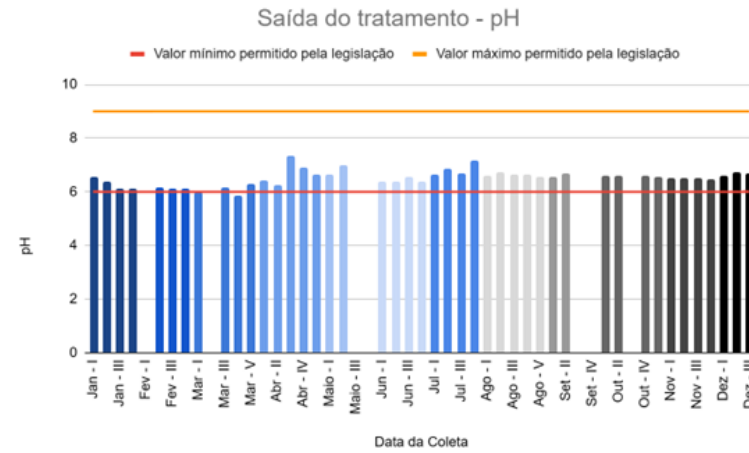
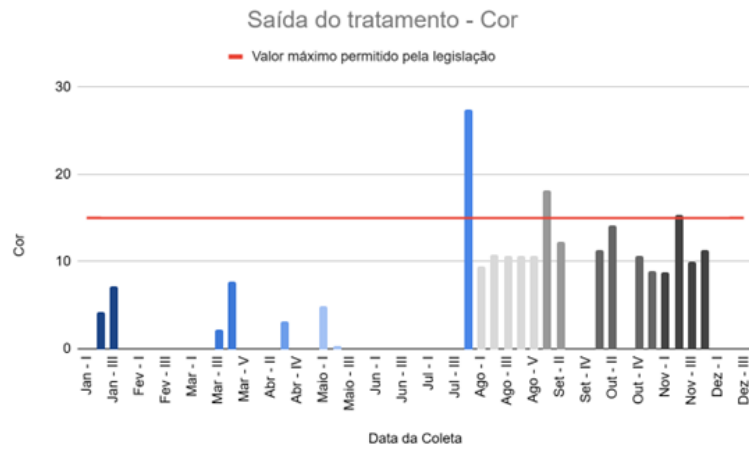
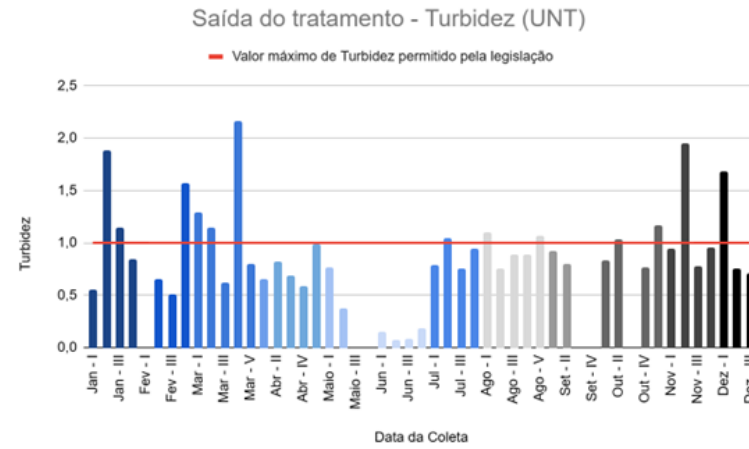
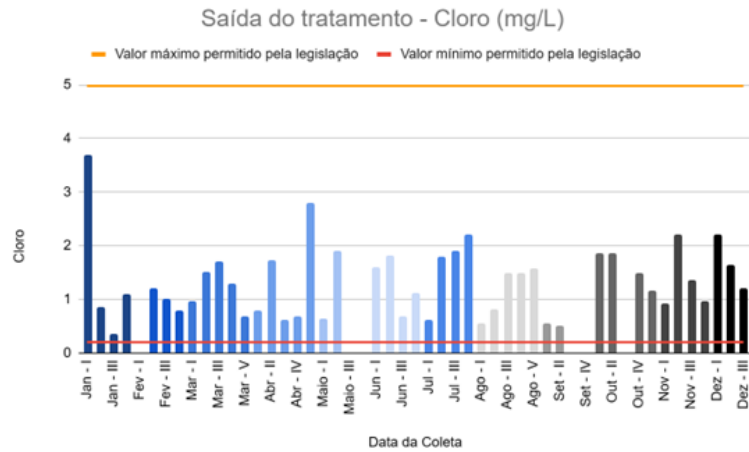
Além disso, esse resultado também pode estar associado às características da água subterrânea, que em geral, apresenta menor vulnerabilidade à contaminação microbiológica em comparação às águas superficiais, devido ao efeito de filtração natural promovido pelo solo e pelas formações geológicas ao longo do escoamento subsuperficial (CHAUDHARI et al., 2025).

Apesar da sua relevância como indicador primário, o monitoramento exclusivo da *E. coli* não é suficiente para atestar a segurança microbiológica absoluta da água. Segundo Heller e Pádua (2010), isso ocorre porque patógenos como vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos são mais resistentes a desinfecção, através da cloração, do que as bactérias. Consequentemente, a ausência de *E. coli* não garante que a água esteja livre de organismos mais resistentes. No entanto, a adoção dessa bactéria se mantém como o padrão mais usual nos

sistemas de abastecimento, visto que sua detecção apresenta rapidez analítica e custos reduzidos em comparação à análise de outros patógenos.

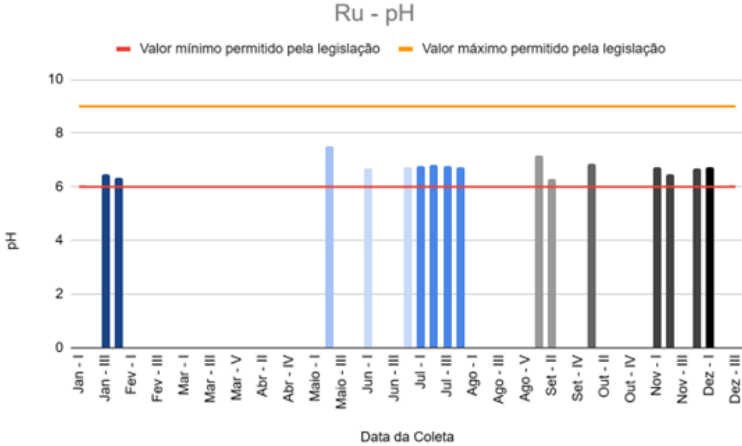
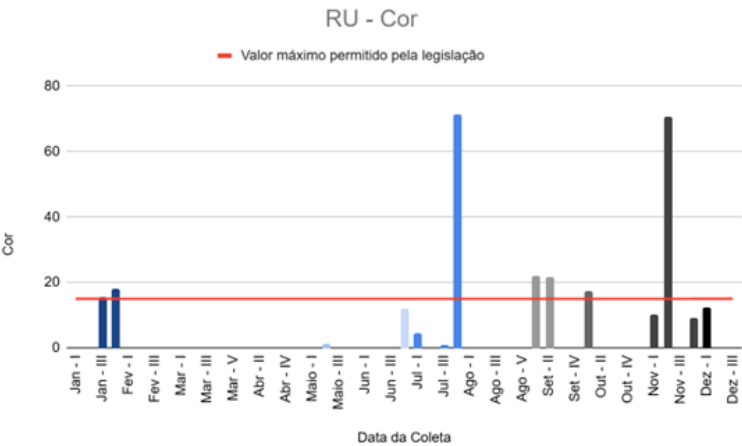
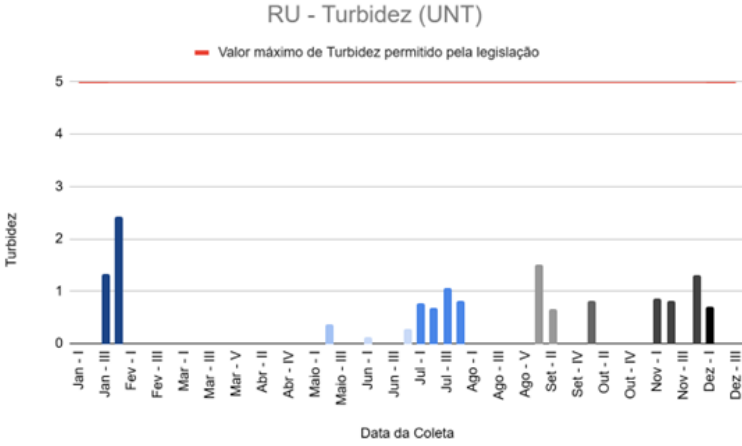
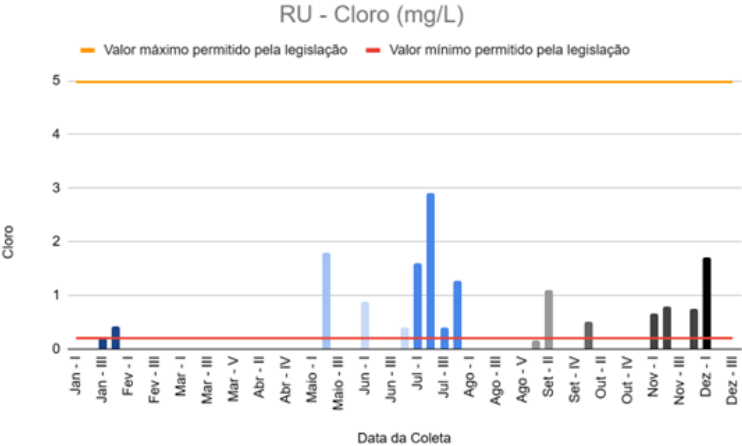
Nas análises físico-químicas, observou-se variação na ocorrência de não conformidades, sendo possível que uma mesma amostra apresentasse mais de um parâmetro fora dos limites estabelecidos pela legislação. O pH foi o parâmetro com menor incidência de não conformidade, com apenas 2 amostras fora da faixa recomendada. Em seguida, a turbidez apresentou 19 amostras com valores superiores ao permitido, enquanto o cloro residual registrou 21 amostras em não conformidade. Por fim, o parâmetro cor destacou-se como o mais crítico, totalizando 107 amostras acima do valor máximo estabelecido pela legislação vigente. As Figura 2,3,4,5,6,7,8,9 e 10, mostram os resultados obtidos por ponto de amostragem.

Figura 2 - Resultados das análises de cloro, turbidez, cor e pH mensurados semanalmente na saída do tratamento (P0).



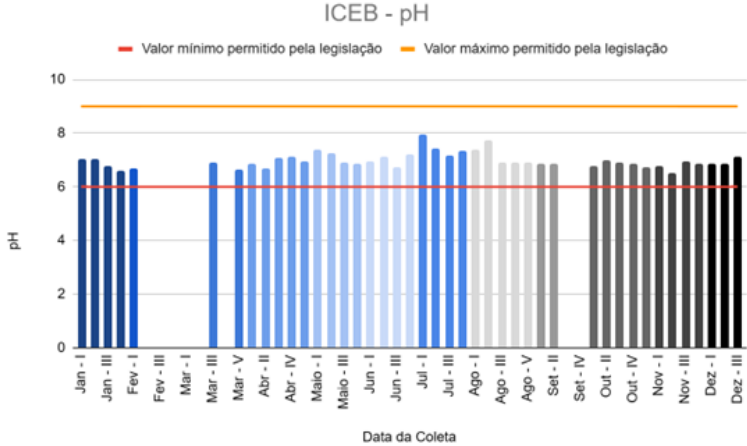
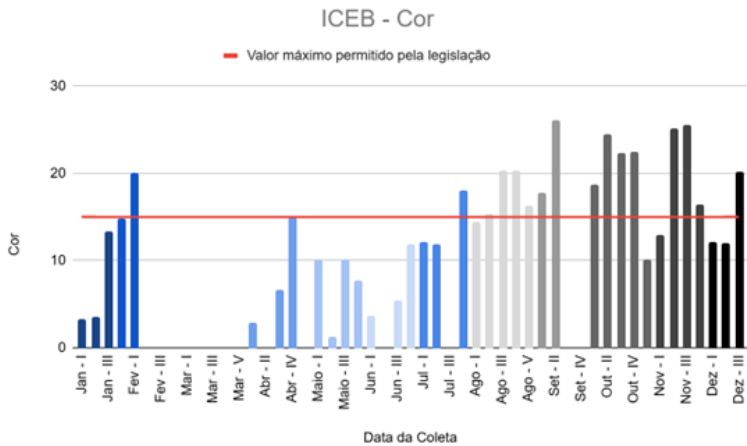
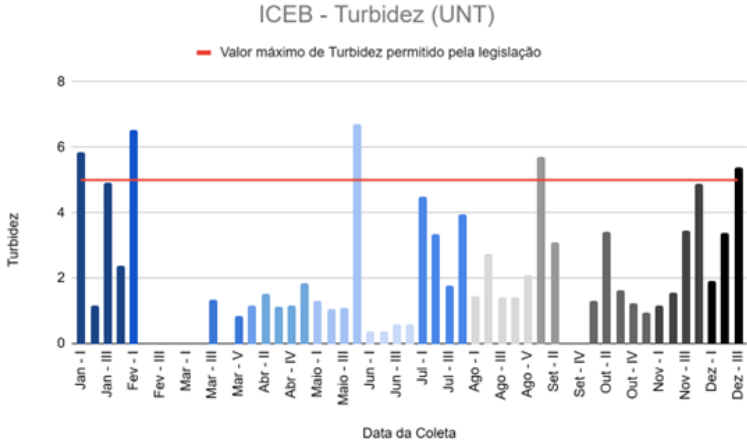
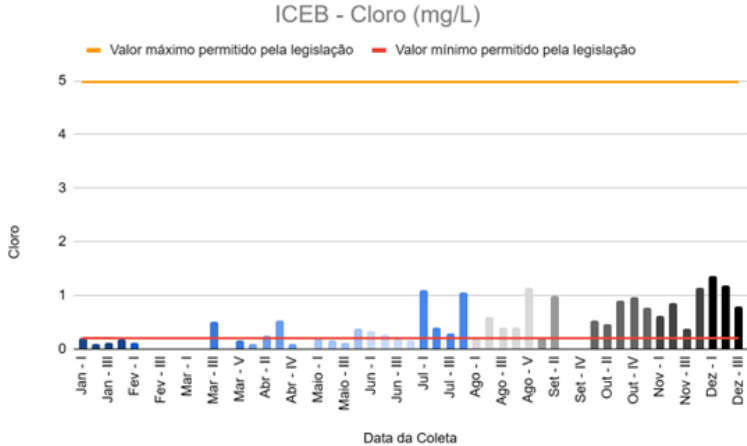
Fonte: Autora, 2025.

Figura 3 - Resultados das análises de cloro, turbidez, cor e pH mensurados semanalmente no RU (P1).



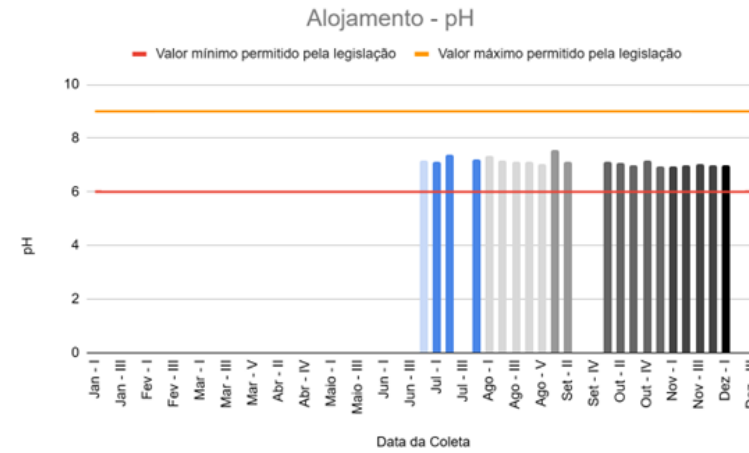
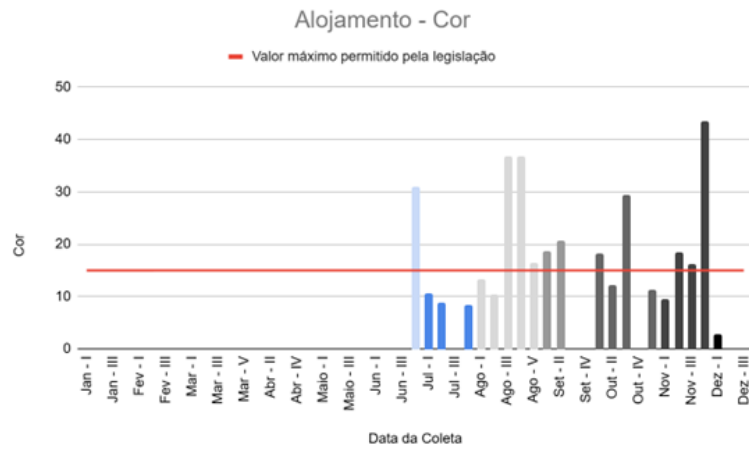
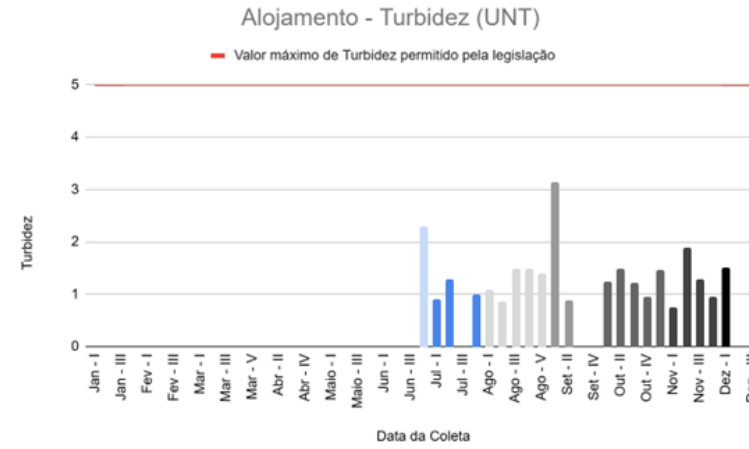
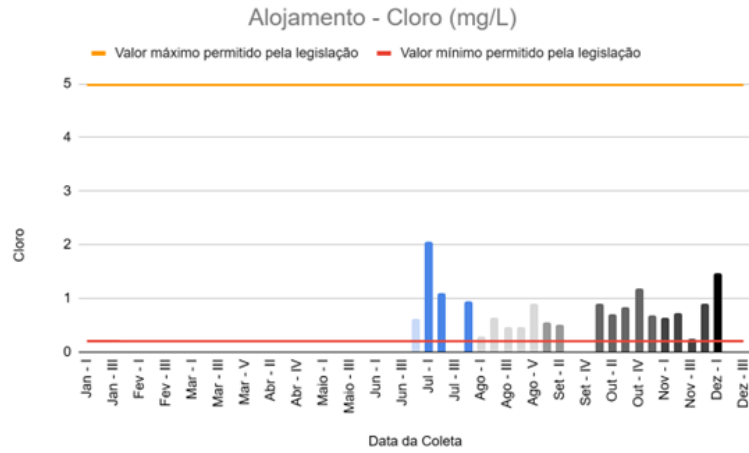
Fonte: Autora, 2025.

Figura 5 - Resultados das análises de cloro, turbidez, cor e pH mensurados semanalmente no ICEB (P3).



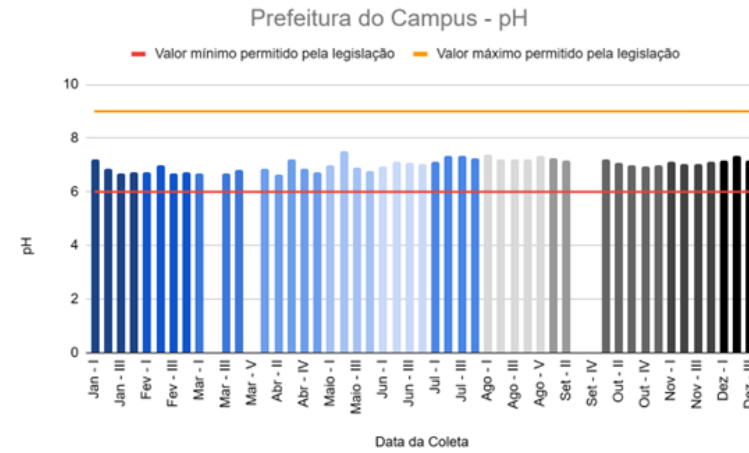
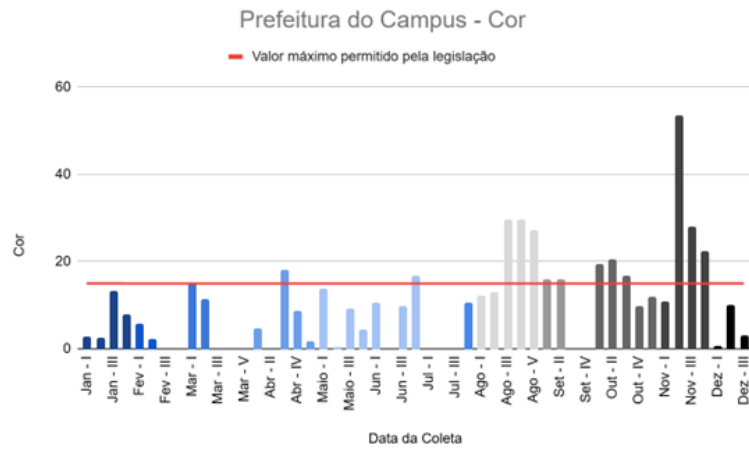
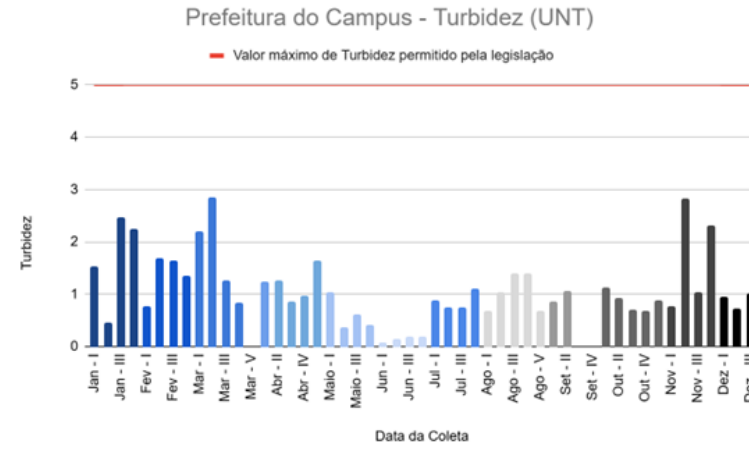
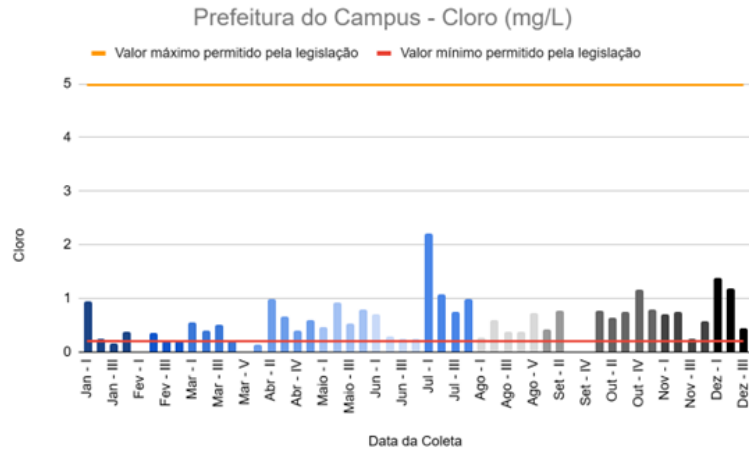
Fonte: Autora, 2025.

Figura 6 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente no alojamento (P4).



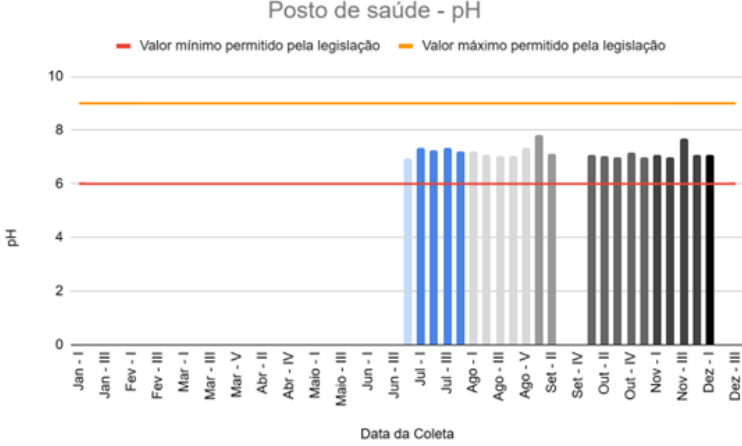
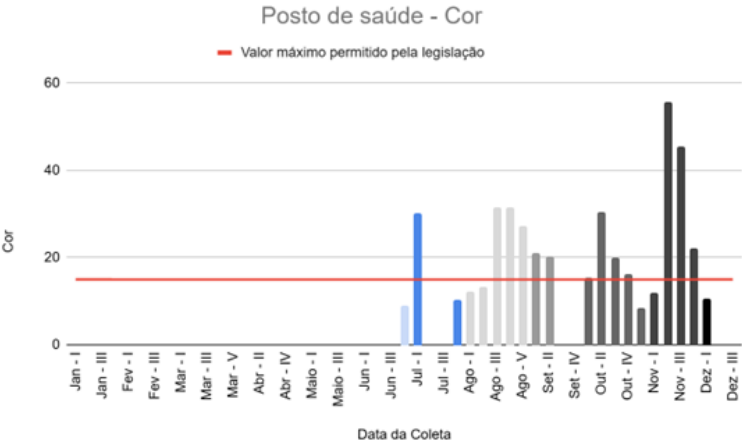
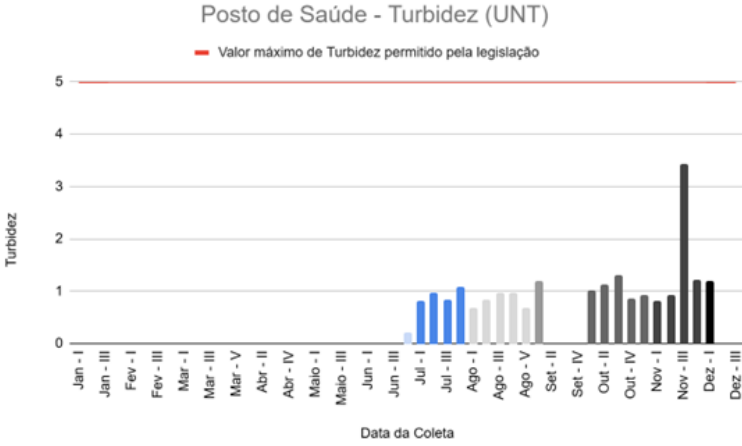
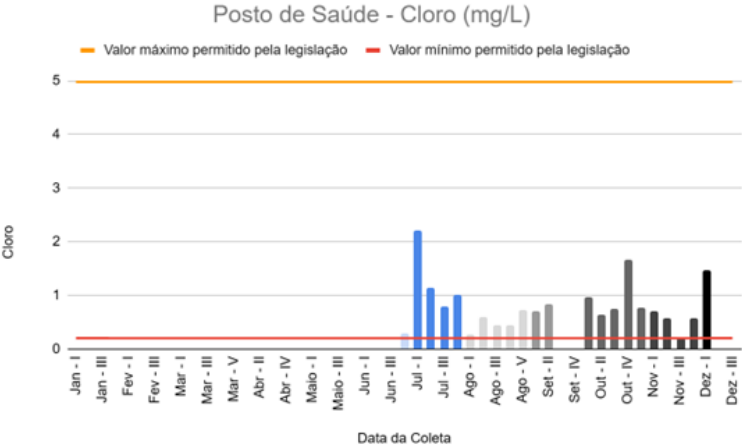
Fonte: Autora, 2025.

Figura 7 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente na prefeitura (P5).



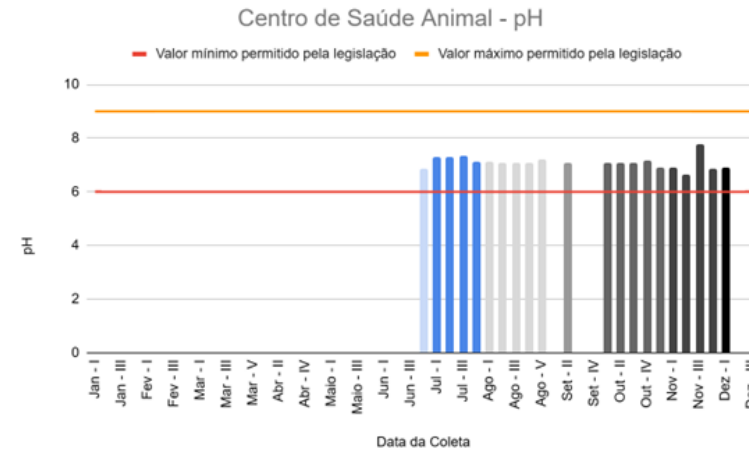
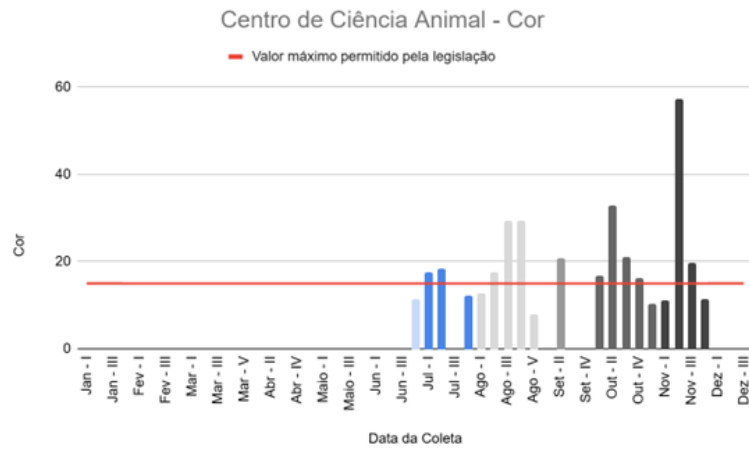
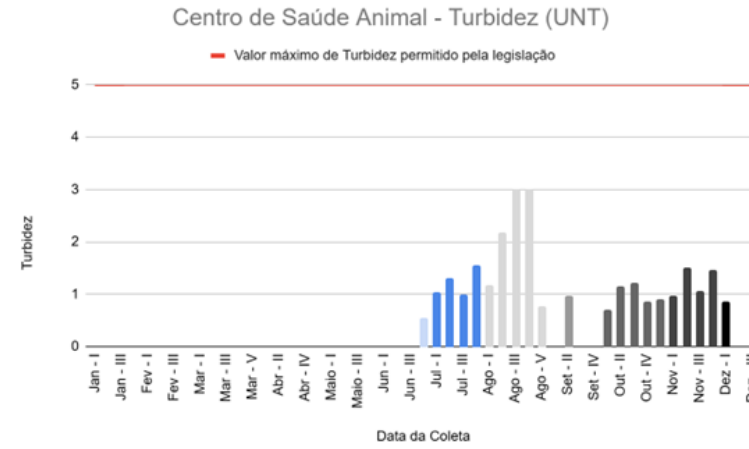
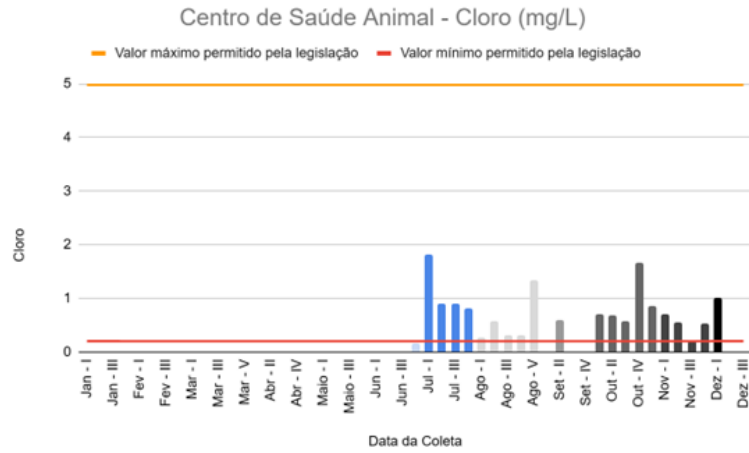
Fonte: Autora, 2025.

Figura 8 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente no posto de saúde (P6).



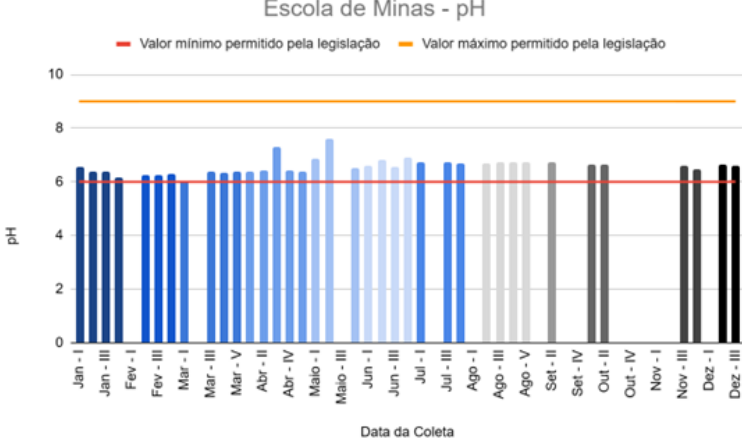
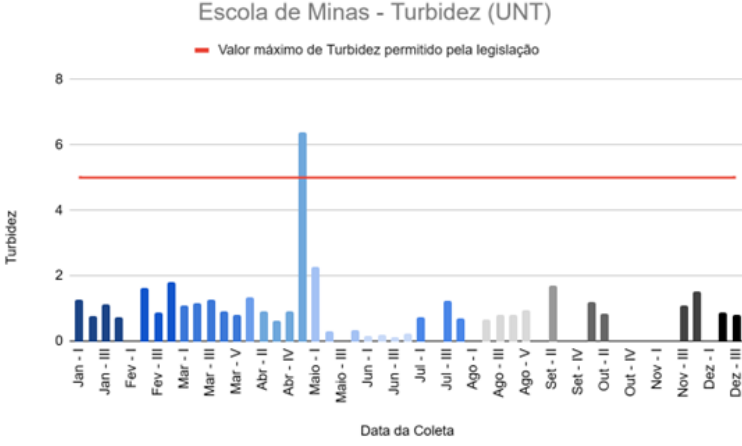
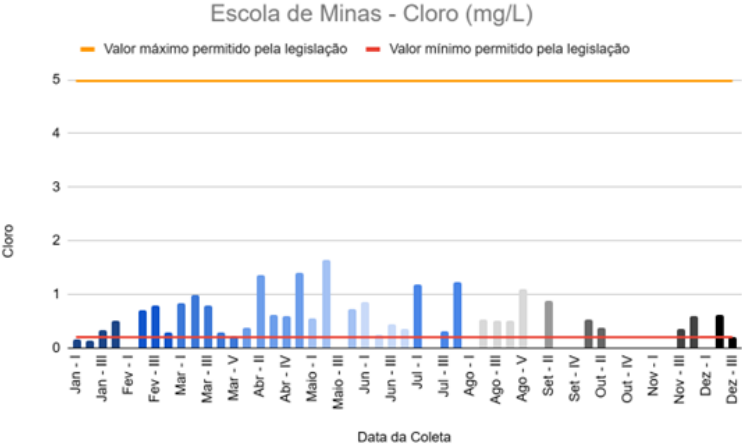
Fonte: Autora, 2025.

Figura 9 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente no centro de ciência animal (P7).



Fonte: Autora, 2025.

Figura 10 - Resultados das análises de cor, cloro, pH e turbidez mensurados semanalmente na Escola de Minas (P8).



Fonte: Autora, 2025.

Segundo a Organização Mundial da Saúde, valores de pH fora da faixa recomendada podem comprometer a ação do cloro residual, reduzindo sua eficiência desinfetante, além de favorecer processos de corrosão ou incrustação nas tubulações (WHO, 2017). Neste estudo, apenas 2 amostras estiveram fora da faixa de recomendação, essa baixa ocorrência de não conformidade observada indica que, o pH não se configurou como um fator crítico para o comprometimento da qualidade da água, em consonância com o que é descrito por APHA (2017) para sistemas subterrâneos adequadamente monitorados.

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, a turbidez da água na saída do tratamento deve apresentar valor máximo de 1 uT em, no mínimo, 95% das amostras analisadas. Além disso, segundo Heller e Pádua (2010), valores de turbidez menores que 5 uT no sistema de distribuição são geralmente aceitos pelos usuários, no entanto, orienta-se que a turbidez seja ainda mais baixa, inferior a 1 uT, uma vez que partículas em suspensão podem comprometer a eficiência dos processos de desinfecção.

Nas análises realizadas, embora a maioria das amostras tenha apresentado valores dentro do limite legal estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, foram identificadas 19 amostras com turbidez acima do permitido, das quais 13 ocorreram na saída do tratamento, etapa em que a legislação estabelece o limite mais restritivo de 1 uT. Observou-se que 28,8% das análises realizadas nesse ponto apresentaram valores superiores ao limite estabelecido, percentual significativamente acima do máximo de 5% admitido pela legislação. Esses resultados indicam a importância da implantação de um sistema de filtração como medida complementar de segurança, uma vez que os filtros são responsáveis pela remoção de partículas em suspensão que contribuem diretamente para o aumento da turbidez e podem comprometer a eficiência da desinfecção (HELLER; PÁDUA, 2010).

Dessa forma, os resultados de turbidez levam à reflexão proposta por Heller e Pádua (2010) acerca da elevada resistência química de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* sp. aos processos de cloração. Considerando a ausência de uma barreira física no tratamento, a turbidez assume importante função como indicador sanitário. Segundo os autores, a remoção da turbidez por filtração está associada à remoção de partículas em suspensão, incluindo enterovírus, cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* sp.. Assim, por apresentarem dimensões particuladas capazes de contribuir para a turbidez da água, as não conformidades observadas nesse parâmetro podem causar reflexões acerca da possível presença desses patógenos.

Segundo o Ministério da Saúde (BRASIL, 2006), a eficiência do cloro residual está associada a outros parâmetros de qualidade da água, como pH e turbidez, que interferem em sua estabilidade e capacidade desinfetante. Enquanto o pH governa o equilíbrio químico que define a estabilidade e o poder de oxidação do cloro livre, a turbidez elevada atua como uma barreira física que abriga os microrganismos, reduzindo severamente a capacidade de inativação patogênica do desinfetante.

Conforme discutido por Heller e Pádua (2010), a avaliação do cloro residual deve ser realizada de forma integrada ao monitoramento do sistema de abastecimento, e não de maneira isolada. No presente estudo, a ocorrência de 21 amostras com concentrações fora do intervalo recomendado pela Portaria GM/MS nº 888/2021, distribuídas em diferentes pontos da rede, indica a influência de fatores operacionais e hidráulicos, como tempo de detenção da água e condições da infraestrutura de distribuição. Apesar dessas não conformidades, ao correlacionar os resultados com as análises microbiológicas, observa-se que o cloro residual foi eficaz na inativação de microrganismos potencialmente patogênicos, uma vez que não foram registradas não conformidades para esse parâmetro ao longo do período de monitoramento.

Neste estudo, o parâmetro cor apresentou a maior incidência de não conformidade, com 107 amostras acima do valor máximo permitido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. A recorrência de valores elevados de cor ao longo da rede de distribuição, especialmente em pontos cujo percurso hidráulico inclui trechos com tubulações de ferro galvanizado, indica a influência dos materiais da tubulação sobre a qualidade da água.

5.3 ANÁLISE DE METAIS

As análises de metais e metaloides indicaram que todas as amostras apresentaram concentrações inferiores aos Valores Máximos Permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, como mostra a Tabela 2. Assim, os resultados indicam que a água analisada está quimicamente dentro dos limites permitidos para consumo humano no Brasil.

Tabela 2 - Conformidade das análises de metais e metaloides realizadas nos pontos de amostragens no Campus Morro do Cruzeiro.

Metais (µg/L)	VMP Portaria	Saída	RU	Conv.	ICEB	Aloj.	Pref.	PS	CCA	EM	LQ
Al	200	3,02	3,72	8,19	9,08	6,28	4,25	4,4	3,67	4,21	0,452
Cr	50	0,282	0,313	0,283	0,39	0,275	0,341	0,297	2,72	0,314	0,036
Mn	100	5,54	7,9	16,89	39,28	41,67	10,25	18,07	10,44	13,98	0,038
Fe	300	4,41	5,39	5,39	19,08	8,3	5,85	6,44	36,51	6,32	0,139
Ni	70	0,923	0,6	1,87	1,37	0,987	0,694	0,948	1,21	0,838	0,066

Cu	2000	0,6	0,523	0,666	3,85	1,62	0,744	1,19	1,52	0,455	0,039
Zn	5000	7,71	6,49	14,92	34,92	20,4	9,45	15,64	10,34	10,3	0,297
As	10	0,918	0,224	2,67	0,196	0,173	0,214	0,142	0,229	0,457	0,015
Se	40	1,19	1,42	1,27	1,78	1,35	1,49	1,4	1,27	1,45	0,415
Cd	3	0,177	0,134	0,188	0,275	0,367	0,205	0,268	0,124	0,354	0,007
Ba	700	17,54	56,03	5,63	7,78	8,21	6,09	5,42	5,24	4,43	0,014
Pb	10	0,163	0,324	0,219	0,447	0,192	0,205	0,239	0,233	0,134	0,001
U	30	0,010	0,017	0,003	0,015	0,013	0,016	0,011	0,009	0,013	0,002
Na	200000	2000	1820	2010	1570	2030	1630	1600	1640	1530	48,4
Ca		6410	6840	6680	6730	7470	6520	6590	6530	6490	21,7
Mg		4010	4620	4340	4440	4830	4190	4210	4250	4380	19,7

Al: alumínio, Cr: cromo, Mn: manganês, Fe: Ferro, Ni: Níquel, Cu: Cobre, Zn: Zinco, As: Arsênio, Se: Selênio, Cd: Cádmio, Ba: Bário, Pb: Chumbo, U: Urânio, Na: Sódio, Ca: Cálcio, Mg: Magnésio, LQ: Limite de detecção.

No contexto brasileiro, em que os padrões de potabilidade são estabelecidos com base em limites máximos permitidos, admite-se a presença de determinados contaminantes em concentrações consideradas seguras, o que implica na necessidade de vigilância constante para evitar ultrapassagens desses limites (PORTARIA GM/MS nº 888/2021). Essa condição deve ser analisada considerando o contexto geológico de Ouro Preto, inserido no Quadrilátero Ferrífero, uma região reconhecida pela elevada concentração de recursos minerais, especialmente ferro e ouro, associada a uma complexa evolução geológica e intensa atividade mineradora (CAVALCANTI et al., 2023).

Estudos indicam que a ocorrência de elementos como o arsênio em águas naturais pode estar associada a processos geogênicos, incluindo a interação água-rocha e a dissolução de minerais, sendo sua mobilização controlada por condições geoquímicas como pH (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002). Além disso, trabalhos realizados na região de Ouro Preto e Mariana demonstram a presença de arsênio em águas subterrâneas associada a contextos geológicos mineralizados, indicando a influência de minerais sulfetados (BORBA; FIGUEIREDO; CAVALCANTI, 2004).

Pesquisas recentes apontam que a distribuição desses elementos está diretamente relacionada à geologia da região e pode ser influenciada tanto por processos naturais quanto por atividades minerárias. Nesse contexto, o monitoramento contínuo da qualidade da água torna-se necessário para compreender a variabilidade das concentrações e auxiliar na distinção entre contribuições de origem geogênica e antrópica. (MEDEIROS FILHO et al., 2025).

5.4 ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE LANGELIER

Buscando conhecer os desafios associados e diminuir os riscos, considerando as evidências de possível influência da rede de distribuição sobre a qualidade da água, especialmente no parâmetro cor, tornou-se pertinente avaliar o comportamento da água sob o ponto de vista de sua estabilidade química. Para isso, foi mensurado o Índice de Saturação de Langelier, que leva em consideração os parâmetros pH, Condutividade Elétrica, Sólidos Totais Dissolvidos, temperatura e Alcalinidade, os resultados estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado das análises da água bruta e tratada na saída do tratamento realizadas no multiparâmetros.

Parâmetros	Água bruta	Água tratada
pH	7,37	7,72
Potencial de Oxirredução (mV)	536,4	582,5
Condutividade Elétrica (µS/cm)	73	292
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/l)	36	147
Temperatura (°C)	19	19
Alcalinidade (mg/L)	46	43

O Índice de Saturação de Langelier (LSI) é amplamente utilizado na avaliação da estabilidade química da água, especialmente em sistemas de abastecimento. O índice compara o pH real da água com o pH de saturação do carbonato de cálcio, permitindo inferir sua tendência à corrosão ou incrustação (LANGELIER, 1936). Valores positivos indicam supersaturação e potencial de precipitação de CaCO_3 , enquanto valores negativos sugerem tendência corrosiva (APHA, 2017).

Para a determinação da dureza cálcica, conforme descrito por P. Chris Wilson (2023), a concentração de cálcio deve ser convertida para equivalente em CaCO_3 por meio de um fator estequiométrico. Esse fator é obtido a partir da razão entre as massas molares do CaCO_3 e do Ca:

$$\frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{Ca}}} = \frac{100,1}{40,1} = 2,497$$

Dessa forma, a dureza cálcica pode ser expressa como:

$$\text{Dureza cálcica} = [\text{Ca}] \times 2,497$$

Aplicando-se à concentração de cálcio determinada:

$$D = 6,41 \times 2,497 = 16,006 \text{ mg/L}$$

Em seguida, realizou-se o cálculo do pH de saturação (pHs), conforme a equação proposta por Langelier (1936), que relaciona os parâmetros sólidos totais dissolvidos,

temperatura, dureza cálcica e alcalinidade. Substituindo-se os valores obtidos na equação, tem-se:

$$pH_s = 9,3 + \left[\frac{\log(147) - 1}{10} \right] + [-13,2 \times \log(19 + 273) + 34,55] - [\log(16,006)] - [\log(46)]$$

O valor calculado para o pH de saturação foi:

$$pH_s = 8,56$$

Com o pH de saturação determinado, realizou-se o cálculo do Índice de Saturação de Langelier (LSI), a partir da diferença entre o pH medido na água tratada e o pH de saturação, conforme a expressão:

$$LSI = 7,72 - 8,56$$

$$LSI = -0,84$$

Avaliando o LSI, observa-se que a água apresenta tendência à corrosão, uma vez que o índice indica condição de subsaturação em relação ao carbonato de cálcio, desfavorecendo a precipitação e podendo promover a dissolução desse composto nas superfícies das tubulações (KELLNER et al., 2022). Ressalta-se que, conforme discutido por Léo Heller e Valter Lúcio de Pádua (2010), o índice não considera fatores hidráulicos e características dos materiais das tubulações, que também exercem influência significativa nos processos de corrosão e incrustação.

No âmbito da instituição, é de conhecimento que determinados trechos da rede de distribuição encontram-se em condições precárias de conservação, apresentando processos de corrosão externa, conforme ilustrado na Figura 11, além de indícios de corrosão interna e ocorrência de pontos de marejamento no trecho final da tubulação.

Figura 11 - Tubulação de recalque de corrosões acentuadas.



Fonte: Acervo da Universidade Federal de Ouro Preto (2023).

A saída do tratamento é o único ponto no qual a água ainda não contato com essa tubulação metálica e sua inconformidade com o parâmetro cor, foi em apenas 3 amostras, logo as outras 104 amostras com não conformidade no parâmetro cor, passaram pela tubulação de ferro fundido do sistema hidráulico em questão. A literatura aponta que tubulações metálicas estão sujeitas a processos de corrosão interna, os quais promovem a liberação de ferro dissolvido e produtos de corrosão, capazes de alterar parâmetros da água, como a cor, mesmo quando a água captada apresenta boa qualidade na origem (Heller & Pádua, 2010; Richter, 2009).

Ao correlacionar as ocorrências de não conformidade no parâmetro cor com o calendário letivo de 2024, observa-se uma tendência de aumento dos valores após períodos de menor consumo de água no campus. Esse comportamento torna-se evidente no mês de agosto, quando do retorno das atividades acadêmicas foi registrada maior incidência de amostras acima do limite estabelecido pela legislação. Segundo Heller e Pádua (2010), maiores tempos de detenção hidráulica e menores velocidades de escoamento favorecem a deposição de materiais nas paredes das tubulações, uma vez que reduzem o cisalhamento hidráulico e aumentam o tempo de contato entre a água e o material da rede. No presente estudo, a elevação da cor observada após períodos de menor consumo sugere o aumento do tempo de residência da água

no sistema de distribuição, o que pode ter favorecido a intensificação dos processos de corrosão, sobretudo em função das características natural corrosivas da água.

Zhang et al. (2024) observaram que alterações na estabilidade química da água e os processos de corrosão nas tubulações podem favorecer a liberação de ferro acumulado na rede de distribuição, contribuindo para episódios de descoloração da água. Segundo os autores, a corrosão e o rompimento das camadas internas formadas nas tubulações promovem o desprendimento de compostos ferrosos para a água distribuída, intensificando problemas de coloração amarelada ou avermelhada. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a elevada não conformidade no parâmetro cor observada ao longo da rede de distribuição analisada pode estar relacionada a corrosão interna da tubulação metálica e a posterior liberação de ferro.

Embora os resultados microbiológicos e de metais indiquem conformidade com a legislação vigente, as não conformidades observadas no parâmetro cor, associadas à presença de corrosão na rede de distribuição, evidenciam vulnerabilidades estruturais no sistema de abastecimento, uma vez que a liberação de ferro proveniente da corrosão das tubulações constitui uma das principais causas de água colorida em sistemas de distribuição (SARIN et al., 2004; ZHANG et al., 2022).

Tais condições sugerem um baixo risco imediato à saúde, uma vez que a água atende, em sua maioria, aos padrões de potabilidade estabelecidos, contudo, representam fragilidades operacionais que podem comprometer a estabilidade da qualidade da água no médio e longo prazo, considerando que alterações físico-químicas e biológicas podem ocorrer ao longo do sistema de distribuição (ZHOU et al., 2023). Por isso, apesar do sistema apresentar segurança sanitária, vê-se a necessidade de intervenções para mitigar riscos futuros.

Visando a uma avaliação mais abrangente da potabilidade da água, recomenda-se a realização integral do monitoramento previsto na Portaria GM/MS nº 888/2021, contemplando todos os parâmetros exigidos para o controle da qualidade da água destinada ao consumo humano. Adicionalmente, sugere-se a execução de análises microbiológicas complementares, capazes de fornecer evidências concretas sobre a eficiência dos processos de desinfecção, bem como a realização de estudos voltados à identificação e avaliação dos potenciais perigos e riscos associados aos subprodutos da corrosão presentes no sistema de distribuição (BRASIL, 2021).

Com o objetivo de mitigar os riscos associados às vulnerabilidades identificadas no sistema de distribuição, recomenda-se que a instituição avalie a substituição dos trechos de tubulação em ferro fundido que apresentam maior grau de deterioração por materiais mais resistentes à corrosão, cuja especificação técnica deve ser previamente analisada para garantir

compatibilidade com as características físico-químicas da água e evitar degradação precoce. Nos segmentos em que a substituição integral não seja viável, recomenda-se a adoção de medidas de reabilitação conforme descrito por Heller e Pádua (2010), que consistem na limpeza interna da tubulação seguida do revestimento da superfície interior, técnica amplamente aplicada em tubulações metálicas com problemas de corrosão ou incrustação. Ademais, para os demais trechos da rede, incluindo aqueles constituídos por PVC, recomenda-se a realização periódica de limpeza por meio de equipamentos específicos para remoção de materiais por raspagem, conforme orientações técnicas apresentadas por Heller e Pádua (2010).

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa avaliou de forma integrada a qualidade da água e as condições da rede de distribuição do Campus Morro do Cruzeiro (UFOP), com captação subterrânea e desinfecção por cloração. Os resultados demonstraram conformidade microbiológica e química com os padrões da Portaria GM/MS nº 888/2021, evidenciando a eficácia do sistema na proteção contra riscos patogênicos e na manutenção de metais abaixo dos Valores Máximos Permitidos (VMP).

Contudo, a elevada incidência de não conformidades no parâmetro cor, correspondente a 37% das amostras analisadas, revelou vulnerabilidades estruturais relevantes. A diferença entre a qualidade na saída do tratamento e nos pontos de consumo evidencia que a diminuição da qualidade ocorre principalmente na infraestrutura, especialmente nos trechos de tubulação metálica com cerca de 20 anos de uso.

Além da tendência à corrosão da água indicada pelo Índice de Saturação de Langelier (LSI), a elevação da cor após períodos de baixo consumo sugere que o aumento do tempo de detenção hidráulica favorece a liberação de produtos de corrosão acumulados na rede. Embora tais condições não indiquem risco imediato à saúde, configuram fragilidades operacionais que podem comprometer a estabilidade da qualidade da água a longo prazo.

Diante disso, recomenda-se a substituição progressiva das tubulações metálicas degradadas, a reabilitação estrutural mediante limpeza e revestimento interno, bem como a continuidade do monitoramento sistemático, de modo a assegurar a manutenção da potabilidade e a segurança hídrica da comunidade acadêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABANYIE, Samuel Kojo et al. Sources and factors influencing groundwater quality and associated health implications: A review. *Emerging Contaminants*, v. 9, n. 2, p. 100207, 2023. DOI: 10.1016/j.emcon.2023.100207. Acesso em: 11 mai. 2026.

ADDISIE, M. B. Evaluating drinking water quality using water quality parameters and esthetic attributes. *Air, Soil and Water Research*, v. 15, e11786221221075005, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/11786221221075005>. Acesso em: 11 fev. 2026.

AL HAMZAH, A. A. et al. Dolomite for supplementation of desalinated drinking water in Saudi Arabia with magnesium, calcium and hydrogen carbonate ions. *Discover Water*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00210-4>. Acesso em: 12 fev. 2026.

ALIPOUR, V. et al. Evaluation of corrosion and scaling tendency indices in a drinking water distribution system: a case study of Bandar Abbas city, Iran. *Journal of Water and Health*, v. 13, n. 1, p. 203–209, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2014.157>. Acesso em: 13 fev. 2026.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Pacto pela governança da água. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>. Acesso em: 23 fev. 2025.

APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; FERNÁNDEZ, Miguel. *Hidráulica básica*. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

BARROS, H. J. L. et al. Avaliação microbiológica da água de soluções alternativas coletivas do município de Marabá-PA. *Revista Saúde e Meio Ambiente*, v. 11, n. 2, p. 84–95, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/sameamb/article/view/10919>. Acesso em: 11 maio 2026.

BAZÍLIO, A. P. A efetividade do Programa de Recebimento e Monitoramento de Efluentes não Domésticos à promoção da segurança hídrica ecossistêmica do Rio Uberabinha em Uberlândia. 2023. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37722/1/EfetividadeDoPremend.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2025.

BITTENCOURT, Vivian; PEREIRA, Diego Emmanoel Serafim. A evolução legislativa brasileira frente à problemática da água. *Revista Brasileira de Direito*, Passo Fundo, v. 10, n. 1, p. 95–105, 2014. Disponível em: <https://seer.atitus.edu.br/index.php/revistadedireito/article/view/595>. Acesso em: 17 abr. 2026.

BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; CAVALCANTI, J. A. Arsênio em águas subterrâneas na região de Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). *REM: Revista*

Escola de Minas, v. 57, n. 1, p. 45–49, 2004. DOI: 10.1590/S0370-44672004000100009. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 23 jan. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf. Acesso em: 23 jan. 2025.

BRASIL. Decreto nº 79.367, de 9 de março de 1977. Dispõe sobre normas e o padrão de potabilidade de água e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 10 mar. 1977. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1970-1979/d79367.htm. Acesso em: 19 abr. 2026.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. Programa Nacional de Saneamento Rural. Brasília: Funasa, 2019. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/MNL_PNSR_2019.pdf. Acesso em: 19 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445/2007. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA). Painel de indicadores – módulo abastecimento de água. 2024. Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=agua>. Acesso em: 18 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Guia alimentar para a população brasileira. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2008. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/guia_alimentar_populacao_brasileira_2008.pdf. Acesso em: 3 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc0005_03_10_2017.html. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 17 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 1.469, de 29 de dezembro de 2000. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2000/prt1469_29_12_2000.html. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2004/prt0518_25_03_2004.html. Acesso em: 17 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf. Acesso em: 14 abr. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Vigilância da qualidade da água para consumo humano: marcos conceituais, institucionais e legais. Brasília: Ministério da Saúde, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-ambiental/vigiagua/formacao-continuada/apostilas/modulo-i-marcos-conceituais-institucionais-e-legais-2a-edicao.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2026.

CAVALCANTI, J. A. D. et al. Geoconservation of geological and mining heritage related to banded iron formation of Itabira Group, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: A challenging issue. *International Journal of Geoh Heritage and Parks*, v. 11, n. 1, p. 118–148, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2022.12.002>. Acesso em: 22 abr. 2026.

CHAUDHARI, S. et al. Data-driven insights into urban groundwater contamination: A framework for SDG 6 implementation in developing countries. *Cleaner Water*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100351>. Acesso em: 07 abr. 2026.

CORONADO-HERNÁNDEZ, O. E. et al. Dynamic effects of a regulating valve in the assessment of water leakages in single pipelines. *Water Resources Management*, v. 38, p. 2889–2903, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03797-w>. Acesso em: 06 abr. 2026.

DAHAN, Ofer. Vadose Zone Monitoring as a Key to Groundwater Protection. *Frontiers in Water*, v. 2, p. 599569, 2020. DOI: 10.3389/frwa.2020.599569. Acesso em: 11 mai. 2026.

FARH, H. M. H. et al. Analysis and ranking of corrosion causes for water pipelines: a critical review. *npj Clean Water*, v. 6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00275-5>. Acesso em: 06 abr. 2026.

FORIPES - Fórum das Instituições Públicas de Ensino Superior do Estado de Minas Gerais. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em números. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://www.foripes.org.br/index.php/universidade-federal-de-ouro-preto-ufop-em-numeros/>. Acesso em: 21 maio 2026.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (Brasil). Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs. 2. ed. Brasília, DF: Funasa, 2021. 112 p. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/491>. Acesso em: 14 abr. 2026.

GUTIÉRREZ-CAPITÁN, M.; BRULL-FONTSERÈ, M.; JIMÉNEZ-JORQUERA, C. Organoleptic analysis of drinking water using an electronic tongue based on electrochemical

microsensors. *Sensors*, v. 19, n. 6, p. 1435, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19061435>. Acesso em: 12 fev. 2026.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de (org.). *Abastecimento de água para consumo humano*. 2. ed. rev. e atual. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

KELLNER, E.; OLIVEIRA, F. E. S. A agressividade da água e a possibilidade de alteração da qualidade para o consumo humano. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, n. 1, p. 159-168, 2022. Doi: 10.1590/s1413-415220200372. Acesso em: 20 maio 2026.

LANGELIER, W. F. The analytical control of anti-corrosion water treatment. *Journal - American Water Works Association*, v. 28, p. 1500–1521, 1936. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1936.tb13785.x>. Acesso em: 2 fev. 2026.

LI, M.; LIU, Z.; CHEN, Y.; HAI, Y. Characteristics of iron corrosion scales and water quality variations in drinking water distribution systems of different pipe materials. *Water Research*, v. 106, p. 593–603, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.044>. Acesso em: 11 fev. 2026.

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. 3. ed. Campinas: Átomo, 2010. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/fundamentos-de-qualidade-e-tratamento-de-agua-by-marcelo-libanio-pdf-free.html>. Acesso em: 19 abr. 2026.

LIBRETEXTS. Porosity and Permeability. Geosciences LibreTexts, 2024. Disponível em: https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geology/Geology_%28Lumen%29/11%3A_Hydrology/11.12%3A_Reading-_Porosity_and_Permeability. Acesso em: 11 abr. 2026.

LYTLE, D. A.; TANG, M.; FRANCIS, A. T. et al. The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron. *Water Research*, v. 183, 116037, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116037>. Acesso em: 13 fev. 2026.

MEDEIROS FILHO, Lucio Cardoso de et al. Spatial distribution, potential sources and geochemical baseline of Fe and potentially toxic elements in stream sediments in Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Applied Geochemistry*, v. 190, p. 106483, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106483>. Acesso em: 12 abr. 2026.

MUREI, A. et al. Barriers to Water and Sanitation Safety Plans in Rural Areas of South Africa—A Case Study in the Vhembe District, Limpopo Province. *Water*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14081244>. Acesso em: 20 de fev. 2025.

NASCIMENTO, S. T.; CASTRO, P. T. A. Modelagem da geodiversidade para o anticlinal de Mariana, sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geologia USP*.

Série Científica, v. 19, n. 1, p. 117-127, 2019. Disponível em:

<https://revistas.usp.br/guspsc/article/view/134534>. Acesso em: 21 maio 2026.

ONU NEWS. Uso da água cresce duas vezes mais rápido do que população mundial, alerta FAO. ONU News, 19 mar. 2018. Disponível em:

<https://news.un.org/pt/story/2018/03/1615142>. Acesso em: 23 jan. 2025.

OLUKOYA, O. A. et al. Evaluation of water quality and potential scaling of corrosion in the water supply using water quality and stability indices: A case study of Juja water distribution network, Kenya. *Heliyon*, v. 8, n. 4, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09141>. Acesso em: 20 maio 2026.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE; FUNDO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA. 1 in 4 people globally still lack access to safe drinking water. 2025. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/26-08-2025-1-in-4-people-globally-still-lack-access-to-safe-drinking-water---who--unicef>. Acesso em: 24 jan. 2026.

PEREIRA, Sueli Yoshinaga; ABREU, Ana Elisa Silva de; MURILLO-BERMUDEZ, Luís Fernando. Segurança das águas subterrâneas: uma revisão dos estudos nacionais e internacionais. *Derbyana*, São Paulo, v. 44, e807, 2023. Disponível em:

<https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/807>. Acesso em: 11 abr. 2026.

RAHADI, B. et al. Causes and effects of scale deposition in water supply pipelines in Surakarta City, Indonesia. *Water*, v. 16, n. 16, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.3390/w16162275>. Acesso em: 13 fev. 2026.

RICHTER, C. A. Água: métodos e tecnologia de tratamento. São Paulo: Blucher, 2009. E-book. ISBN 9788521217244.

SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, F. A. C. et al. (coord.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. cap. 5.1, p. 325-357. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>. Acesso em: 12 abr. 2026.

SARIN, P.; SNOEYINK, V. L.; BEBEE, J. et al. Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen. *Water Research*, v. 38, n. 5, p. 1259–1269, 2004. DOI: 10.1016/j.watres.2003.11.022. Acesso em: 21 abr. 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). *Aquíferos*. Brasília, DF: SGB, 2026. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/aquiferos>. Acesso em: 11 maio 2026.

SMEDLEY, P. L.; KINNIBURGH, D. G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, v. 17, n. 5, p. 517–568, 2002. DOI: 10.1016/S0883-2927(02)00018-5. Acesso em: 11 abr. 2026

SOUZA, S. O. et al. Variações em índices de estabilidade da água em reservatório sob condição de seca acentuada do trópico semiárido brasileiro. *Revista DAE*, v. 68, n. 227, p. 132–151, 2020. DOI: 10.36659/dae.2020.086. Acesso em: 20 maio 2026.

SRIVASTAV, A.; PATEL, N.; CHAUDHARY, V. Disinfection by-products in drinking water: Occurrence, toxicity and abatement.. *Environmental pollution*, 267, 115474, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115474>. Acesso em: 12 jan. 2026.

ŚWIETLIK, J.; MAGNUCKA, M. Chemical and microbiological safety of drinking water in distribution networks made of plastic pipes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wat2.1704>. Acesso em: 12 jan. 2026.

ULIANA, M. M. Hidrogeologia básica: uma introdução aos fundamentos da ciência das águas subterrâneas O Projeto de Águas Subterrâneas, 2025. DOI: . Disponível em: <https://doi.org/10.62592/CBIQ7579>. Acesso em: 11 abr. 2026.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Optimal Corrosion Control Treatment Evaluation Technical Recommendations for Primacy Agencies and Public Water Systems. Washington, DC, 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03/documents/occtmarch2016.pdf>. Acesso em: 20 maio 2026.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 1996. 243 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 1). Disponível em: https://www.academia.edu/39149408/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_qualidade_das_%C3%A1guas_e_ao_tratamento_de_esgotos. Acesso em: 21 abr. 2026.

WILSON, P. Chris. Notas sobre a qualidade da água: alcalinidade e dureza. Gainesville: University of Florida IFAS Extension, 2023. (Publicação nº SL 332). DOI: <https://doi.org/10.32473/edis-ss540-2010>. Disponível em: <https://ask.ifas.ufl.edu/publication/SS540>. Acesso em: 19 mar. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization,

2022. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>. Acesso em: 14 abr. 2026.

ZHANG, H et al. Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water distribution systems. *Journal of Environmental Sciences*, v. 117, p. 173–189, 2022. DOI: 10.1016/j.jes.2022.04.024. Acesso em: 21 abr. 2026.

ZHANG, H. et al. Study on a new index for yellow water problem during source water switch and its application on one real project. *Journal of Cleaner Production*, v. 435, p. 140419, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140419. Acesso em: 21 abr. 2026.

ZHOU, Y. et al. Corrosion and water quality deterioration in drinking water distribution systems: A review. *Toxics*, v. 11, n. 7, p. 606, 2023. DOI: 10.3390/toxics11070606. Acesso em: 21 abr. 2026.