

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS
NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO ATERRO SANITÁRIO DE BELO HORIZONTE**

Sarah Estevam Bonfim

Belo Horizonte, 2025

Sarah Estevam Bonfim

**ANÁLISE DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS
NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO ATERRO SANITÁRIO DE BELO HORIZONTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. Dr. Evandro Carrusca de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Wagner Guadagnin Moravia

Belo Horizonte, 2025

SARAH ESTEVAM BONFIM

**ANÁLISE DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS NA
ÁREA DE INFLUÊNCIA DO ATERRAMENTO SANITÁRIO DE BELO HORIZONTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-CEFET/MG como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Data de Aprovação: 16 / 12 / 2025

Banca Examinadora:

Evandro Carrusca de Oliveira – Orientador e Presidente da Banca Examinadora
Prof. Dr. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Wagner Guadagnin Moravia - Coorientador
Prof. Dr. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Gisele Vidal Vimieiro
Profª. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Documento assinado digitalmente
gov.br CICERO ANTONIO ANTUNES CATAPRETA
Data: 18/12/2025 13:18:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cícero Antônio Antunes Catapreta
Dr. Gerente da CTRS BR-040 – SLU/BH

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 21/2025 - DCTA (11.55.03)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 19/12/2025 09:15)

EVANDRO CARRUSCA DE OLIVEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: ####504#0

(Assinado digitalmente em 19/12/2025 07:51)

GISELE VIDAL VIMIEIRO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: ####050#6

(Assinado digitalmente em 19/12/2025 18:40)

WAGNER GUADAGNIN MORAVIA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: ####330#5

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 21, ano: 2025, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: 19/12/2025 e o código de verificação: 4f4f2c12e1

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por cuidar de mim em todo este período, com sabedoria e força para trilhar este caminho.

Agradeço à minha eterna e amada mãe, Xislene Delfina Estevam, que não esteve comigo fisicamente durante todo o processo, mas sempre em meu coração, me dando força e coragem para prosseguir mesmo em dias difíceis.

Agradeço ao meu namorado, Heraldo Quirino Araujo, por me apoiar e estar comigo em todos os momentos.

Meus agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. Evandro Carrusca de Oliveira e coorientador Prof. Dr. Wagner Guadagnin Moravia pela confiança, ensinamentos transmitidos e por me aconselhar e acompanhar, sempre com dedicação, ao longo deste estudo.

Meus agradecimentos ao Prof. Dr. Cícero Antonio Antunes Catapreta pela disponibilidade em me receber no aterro sanitário concomitante ao apoio e ensinamentos oferecidos quanto à área de estudo.

Meus agradecimentos à Superintendência de Limpeza Urbana - SLU pela concessão de dados do monitoramento das águas subterrâneas e superficiais do aterro sanitário 0-40.

Agradeço à minha família pelo apoio e compreensão durante essa etapa da minha vida.

Aos meus amigos da Engenharia Ambiental e Sanitária do CEFET-MG, Ana, Laura, Luana, Maísa e Moema, agradeço os momentos juntos, conselhos e amizade construída durante a graduação.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 8 |
| 2. OBJETIVO..... | 12 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 12 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 12 |
| 3. JUSTIFICATIVA..... | 12 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| 4.1 Caracterização e Composição do Lixiviado..... | 13 |
| 4.2 Impactos Ambientais no Solo e nas Águas..... | 13 |
| 4.3 Riscos à Saúde Pública..... | 14 |
| 4.4 Aterros brasileiros..... | 14 |
| 4.5 Ferramentas e Técnicas de Monitoramento..... | 15 |
| 4.6 Legislação Ambiental e Padrões de Qualidade..... | 15 |
| 4.7 Processos de Impermeabilização em Aterros Sanitários..... | 17 |
| 5. METODOLOGIA..... | 18 |
| 5.1 Caracterização da Área de Estudo..... | 18 |
| 5.2 Descrição e Localização dos Pontos de Monitoramento..... | 22 |
| 5.2.1 Pontos de Superfície Principais (PSP)..... | 24 |
| 5.2.2 Pontos Extras de Água Superficial (PE)..... | 25 |
| 5.2.3 Pontos de Monitoramento Subterrâneo (PM)..... | 25 |
| 5.3 Coleta, tratamento e organização dos dados..... | 25 |
| 5.4 Análises Estatísticas e Gráficas..... | 26 |
| 5.5 Comparação Normativa..... | 27 |
| 6. RESULTADOS..... | 28 |
| 6.1 Análise da Qualidade das Águas Superficiais..... | 29 |
| 6.1.1 Coliformes Termotolerantes (E. Coli)..... | 29 |
| 6.1.2 Coliformes Totais..... | 30 |
| 6.1.3 DBO e DQO..... | 31 |
| 6.1.4 Oxigênio Dissolvido..... | 32 |
| 6.1.5 Nitrogênio Ammoniacal..... | 33 |
| 6.1.6 Cloreto..... | 34 |
| 6.1.7 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)..... | 34 |
| 6.1.8 pH..... | 35 |
| 6.2 Análise da Qualidade das Águas Superficiais nos Pontos Extras - PE..... | 36 |
| 6.2.1 Condutividade Elétrica..... | 36 |
| 6.2.2 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)..... | 37 |
| 6.2.3 Cloretos..... | 38 |
| 6.2.4 Nitratos..... | 39 |
| 6.3 Análise da Qualidade das Águas Subterrânea..... | 40 |
| 6.3.1 Análises PM1..... | 40 |
| 6.3.1.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)..... | 41 |
| 6.3.1.2 DBO, DQO e OD..... | 42 |
| 6.3.1.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli)..... | 43 |
| 6.3.1.4 Turbidez..... | 44 |
| 6.3.2 Análise dos poços PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4..... | 45 |

| | |
|---|----|
| 6.3.2.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)..... | 45 |
| 6.3.2.2 DBO, DQO e OD..... | 46 |
| 6.3.2.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli)..... | 47 |
| 6.3.2.4 Turbidez..... | 48 |
| 6.3.3 Análise dos poços PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11.. | 48 |
| 6.3.3.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)..... | 49 |
| 6.3.3.2 DBO, DQO e OD..... | 49 |
| 6.3.3.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli)..... | 50 |
| 6.3.3.4 Turbidez..... | 51 |
| 6.3.4 Análise dos Poços da Célula Principal..... | 52 |
| 6.3.4.1 Sólidos Dissolvidos Totais - SDT..... | 52 |
| 6.3.4.2 DBO, DQO e OD..... | 55 |
| 6.3.4.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli)..... | 56 |
| 6.3.4.4 Turbidez..... | 60 |
| 6.3.5 Análises PM24, PM25 e PM26..... | 61 |
| 6.3.5.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)..... | 61 |
| 6.3.5.2 DBO, DQO e OD..... | 62 |
| 6.3.5.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli)..... | 63 |
| 6.3.5.4 Turbidez..... | 64 |
| 6.3.6 Análises PM21..... | 65 |
| 6.3.6.1 Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)..... | 65 |
| 6.3.6.2 DBO, DQO e OD..... | 66 |
| 6.3.6.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli)..... | 67 |
| 6.3.6.4 Turbidez..... | 68 |
| 7. DISCUSSÃO..... | 68 |
| 7.1 Água Superficial..... | 68 |
| 7.1.1 Efeitos da Sazonalidade na Água Superficial..... | 70 |
| 7.2 Águas Subterrâneas..... | 71 |
| 7.2.1 Efeitos da Sazonalidade na Água Subterrânea..... | 75 |
| 7.2.2 Análise do PM21 conforme PORTARIA GM/MS Nº 888/2021..... | 76 |
| 8. CONCLUSÃO..... | 76 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 5.1 – Períodos de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas..... | 31 |
| Tabela 7.1 - Comparativo das Análises do Aterro da Prefeitura de Belo Horizonte com a Portaria GM/MG nº 888/2021..... | 81 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Relevo no Aterro Sanitário em 1974..... | 15 |
| Figura 1.2 - Evolução da quantidade de resíduos sólidos urbanos destinados à aterragem, na CTRS BR-040..... | 16 |
| Figura 5.1 - Foto da área impermeabilizada do aterro sanitário 0-40..... | 24 |
| Figura 5.2 - Mapa da Bacia do Córrego Ressaca e nascentes na área do Aterro 0-40..... | 25 |
| Figura 5.3 - Mapa de setorização da CTRS BR-040..... | 26 |
| Figura 5.4 - Mapa de pontos de monitoramento de águas superficiais e subterrâneas..... | 27 |
| Figura 5.5 – Fotos do Córrego Coqueiros, Lagoa e canalização do Córrego Taiobas..... | 28 |
| Figura 5.6 - Mapa de distribuição dos Pontos de Monitoramento e sua Caracterização..... | 29 |
| Figura 6.1 - Concentração de Coliformes Termotolerantes (E. Coli) nos PSPs e Lagoa..... | 35 |
| Figura 6.2 - Concentração de Coliformes Totais nos Pontos de Monitoramento Superficial e Lagoa..... | 36 |
| Figura 6.3 - Concentração de DBO e DQO..... | 36 |
| Figura 6.4 - Concentração e variação do Oxigênio Dissolvido..... | 37 |
| Figura 6.5 - Concentração de Nitrogênio Amoniacal em PSPs e Lagoa..... | 38 |
| Figura 6.6 - Concentração de Cloreto em PSPs e Lagoa..... | 39 |
| Figura 6.7 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PSPs e Lagoa..... | 40 |
| Figura 6.8 - pH em PSPs e Lagoa..... | 41 |
| Figura 6.9 - Concentração de Condutividade Elétrica em PEs..... | 42 |
| Figura 6.10 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PEs..... | 43 |
| Figura 6.11 - Concentração de Cloretos em PEs..... | 44 |
| Figura 6.12 - Concentração de Nitratos em PEs..... | 45 |
| Figura 6.13 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PM1..... | 46 |
| Figura 6.14 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM1..... | 47 |
| Figura 6.15 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. coli) em PM1..... | 48 |
| Figura 6.16 - Concentração de Turbidez em PM1..... | 49 |
| Figura 6.17 - Concentração de SDT em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4..... | 50 |
| Figura 6.18 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4..... | 51 |
| Figura 6.18 - Concentração de Coliforme Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4..... | 52 |
| Figura 6.19 - Concentração de Turbidez em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4..... | 53 |
| Figura 6.20 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11..... | 55 |
| Figura 6.21 - Concentração de Coliformes Totais e Coliformes Termotolerantes (E. Coli) em PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11..... | 56 |
| Figura 6.22 - Concentração de Turbidez em PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11..... | 57 |
| Figura 6.23 - Concentração de SDT em PM12, PM13, PM14, PM15 e PM16.1..... | 58 |
| Figura 6.24 - Concentração de SDT em PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2 e PM17.3..... | 58 |
| Figura 6.25 - Concentração de SDT em PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19 e PM20.1..... | 59 |
| Figura 6.26 - Concentração de SDT em PM20.2, PM20.3, PM21 e PM23..... | 60 |
| Figura 6.27 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM20.2, PM20.3, PM21, PM23..... | 61 |
| Figura 6.28 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1..... | 62 |
| Figura 6.29 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.30 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19, PM20.1..... | 64 |
| Figura 6.31 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM20.2, PM20.3, PM21, PM23), PM21..... | 64 |
| Figura 6.32 - Concentração de Turbidez em PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1..... | 65 |
| Figura 6.33 - Concentração de Turbidez em PM20.2, PM20.3, PM21, PM23..... | 66 |
| Figura 6.34 - Concentração de Turbidez em PM24, PM25 e PM26..... | 67 |
| Figura 6.35 - Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM24, PM25 e PM26..... | 68 |
| Figura 6.36 - Turbidez em PM24, PM25 e PM26..... | 69 |
| Figura 6.37 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PM21..... | 70 |
| Figura 6.38 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM21..... | 71 |
| Figura 6.39 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli)..... | 72 |
| em PM21..... | 72 |
| Figura 6.40 - Concentração de Turbidez em PM21..... | 73 |
| Figura 7.51 - Dendrograma Cluster: Parâmetros com VMP..... | 74 |
| Figura 7.2 - Dendrograma Cluster A: Conjunto dos parâmetros disponíveis..... | 77 |
| Figura 7.3 - Cluster B - Conjunto dos parâmetros que possuem VMP..... | 79 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

AC – Área de Célula

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BR-040 – Rodovia Federal BR-040

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

CTRS BR-040 – Central de Tratamento de Resíduos Sólidos BR-040

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MG – Minas Gerais

OD – Oxigênio Dissolvido

PE – Ponto Extra de Monitoramento de Água Superficial

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

PM – Ponto de Monitoramento de Água Subterrânea

PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PSP – Ponto de Monitoramento de Água Superficial

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

SLU – Superintendência de Limpeza Urbana

URP – Unidade de Recebimento de Pneus

VMP – Valor Máximo Permitido

RESUMO

Este estudo avaliou a qualidade das águas superficiais e subterrâneas do antigo Aterro Sanitário de Belo Horizonte da BR-040, localizado na sub-bacia do Córrego Ressaca, pertencente à Bacia do Ribeirão Onça, cujo enquadramento legal corresponde à Classe 2 para águas doces, conforme Deliberação Normativa COPAM nº 20/1997. Foram analisados dados de múltiplos pontos de monitoramento superficial e subterrâneo, considerando parâmetros físico-químicos e microbiológicos no período de 2020 a 2025. Utilizaram-se comparações normativas, análise estatística como análise de agrupamentos e a relação DBO/DQO, além de gráficos temporais e comparação com séries de precipitação. Foram incorporadas informações cartográficas e históricas da operação, expansão e encerramento das células do aterro, bem como a distribuição espacial da impermeabilização com argila compactada. Os resultados evidenciaram variações significativas entre os pontos monitorados, com maiores impactos associados às áreas encerradas sem impermeabilização e regiões à jusante da célula principal do aterro. Concluindo com integrações de aspectos hidrológicos, geotécnicos, estatísticos e normativos, reforçando a importância do monitoramento contínuo e do controle de percolação de lixiviados.

Palavras-chave: lixiviado; aterros sanitários; resíduos sólidos, disposição final.

ABSTRACT

This study evaluated the quality of surface and groundwater at the Belo Horizonte Sanitary Landfill, located in the Ressaca Stream sub-basin, which belongs to the Onça Stream Basin. The legal classification corresponds to Class 2 freshwater, in accordance with COPAM Normative Deliberation No. 20/1997. Data from multiple surface and groundwater monitoring points were analyzed, considering physicochemical and microbiological parameters over the period from 2020 to 2025. Regulatory comparisons were applied, along with statistical analyses such as cluster analysis and the BOD/COD ratio, as well as temporal graphs and comparisons with precipitation series. Cartographic and historical information on the operation, expansion, and closure of landfill cells were incorporated, together with the spatial distribution of compacted clay impermeabilization. The results revealed significant variations among the monitored points, with greater impacts associated with areas closed without impermeabilization and regions downstream of the main landfill cell. The conclusions integrated hydrological, geotechnical, statistical, and regulatory aspects, reinforcing the importance of continuous monitoring and control of leachate percolation.

Keywords: leachate; sanitary landfills; solid waste; final disposal.

1. INTRODUÇÃO

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU é uma das principais consequências do crescimento populacional e da intensificação das atividades econômicas nas sociedades contemporâneas. O Brasil, atualmente, produz cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, dos quais uma parcela significativa ainda é destinada de forma inadequada a lixões e aterros sanitários sem o devido controle ambiental (IBGE, 2023). De acordo com ABREMA, os 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos equivale a aproximadamente 382 kg por habitante, ou pouco mais de 1 kg por pessoa por dia, referente a 2023. Desse volume, cerca de 93,4% são coletados, sendo 87,8% por serviços públicos e 5,6% por catadores informais.

Os líquidos lixiviados gerados em aterros sanitários, quando gerenciado de forma inadequada, representa um sério risco ao meio ambiente e à saúde pública, pois sua infiltração pode provocar a contaminação do solo, das águas subterrâneas e superficiais, além de impactar negativamente a biodiversidade local (COSTA et al., 2021). A presença de contaminantes como amônia, nitrito, nitrato, além de metais como cádmio, chumbo e mercúrio, pode comprometer irreversivelmente a qualidade dos recursos hídricos e a fertilidade do solo, inviabilizando seu uso para atividades agrícolas, de lazer e de abastecimento (ARAÚJO et al., 2022; HE et al., 2019).

No contexto brasileiro, mesmo aterros classificados como sanitários frequentemente apresentam falhas técnicas, como ausência de sistemas de impermeabilização eficientes, deficiências em sistemas de captação e tratamento de lixiviados, e falta de monitoramento adequado das águas subterrâneas (SILVA; ALMEIDA, 2021). Tais falhas são agravadas pela escassez de investimentos públicos, fiscalização deficiente e pressão urbana crescente em áreas periféricas.

Belo Horizonte enfrenta desafios significativos na gestão dos resíduos sólidos urbanos. Segundo a Superintendência de Limpeza Urbana - SLU, cada um dos 2.315.560 habitantes de Belo Horizonte gerou no ano de 2023, em média, 760 gramas de lixo domiciliar por dia. Em 2023 foram coletadas 643.748,86 toneladas de resíduos sólidos urbanos domiciliares no município. Por dia, em média, a SLU recolhe 1.763,79 toneladas de resíduos domiciliares na capital. (PBH, 2024).

O Aterro 040 embora regularizado e tendo encerrado suas atividades de recebimento de resíduos para aterramento, apresenta preocupações quanto à sua sustentabilidade a longo

prazo. A área é marcada pela presença de córregos, áreas de recarga aquífera e comunidades socialmente vulneráveis.

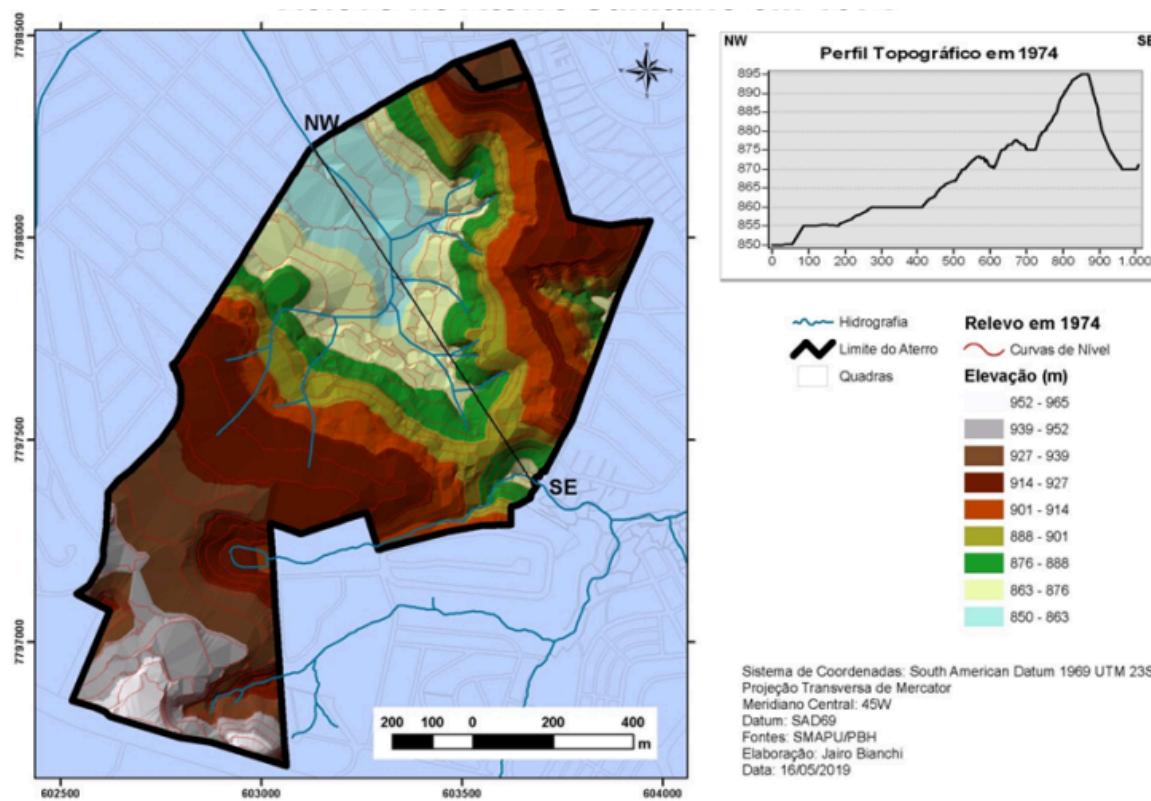
Estudos e relatos técnicos apontam que o sistema de drenagem de líquidos lixiviados no Aterro 040 é frequentemente sobrecarregado, especialmente em períodos de chuvas intensas, elevando o risco de percolação do lixiviado para o solo e contaminação da água subterrânea e superficial (PEREIRA et al., 2023).

Segundo o estudo de Bacellar e Catapreta (UFOP/SLU, 2023), que empregou a técnica de eletrorresistividade para delimitar a pluma de contaminação por líquidos lixiviados, foi possível identificar zonas com baixa resistividade elétrica, indicando elevada umidade e prováveis concentrações de contaminantes, o que confirma a vulnerabilidade do local à migração desses poluentes. Esses achados reforçam a necessidade de constante monitoramento geofísico e hidroquímico na área do aterro, bem como de intervenções para melhoria do sistema de captação e tratamento do lixiviado.

A água subterrânea torna-se um vetor de poluição silenciosa, de difícil remediação e com potencial de disseminação de agentes tóxicos e patogênicos ao longo do tempo (FARIA et al., 2020).

O CTRS BR-040 foi inaugurado em 1975, no bairro Jardim Filadélfia, na região Noroeste da capital. No início de suas atividades, o aterro recebia o volume de 141 t/ano de resíduos provenientes de uma população de 1.557.464 habitantes (BIANCHI; LOPES, 2023). Funcionou como um aterro convencional nos primeiros 14 anos, instalado e operado em conformidade com as normas vigentes à época (Figura 1.1).

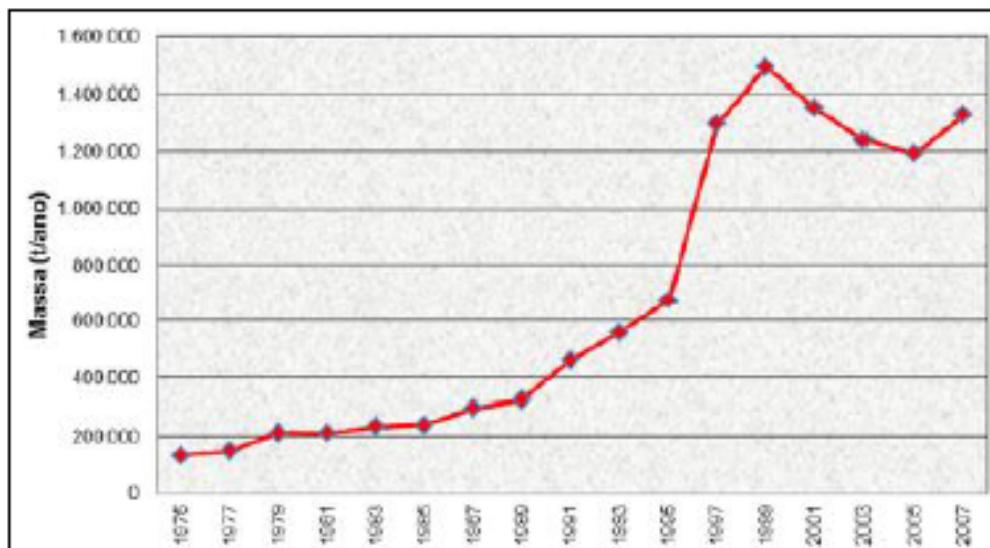
Figura 1.1 - Relevo no Aterro Sanitário em 1974



Fonte: SMAPU, 2016

Entre 1989 e 1995 funcionou como um aterro energético, com aproveitamento do biogás gerado. De 1996 até 2007, ano de seu encerramento, funcionou como aterro sanitário convencional. A Figura 1.2 apresenta a quantidade de resíduos dispostos no aterro sanitário entre 1975 e 2007.

Figura 1.2 - Evolução da quantidade de resíduos sólidos urbanos destinados à aterragem, na CTRS BR-040



Fonte: PMGIRS-BH/2017

Nesse cenário, torna-se imprescindível a realização de estudos aprofundados que envolvam análises físico-químicas e microbiológicas do solo e da água, avaliação dos impactos socioambientais e riscos à saúde pública, bem como modelagens hidrogeológicas para entender o fluxo e a dispersão dos contaminantes. Tais estudos são essenciais para subsidiar estratégias de remediação ambiental, fortalecimento das políticas públicas e implementação de tecnologias mais avançadas e sustentáveis de tratamento de lixiviado (COSTA et al., 2021; SANTOS et al., 2020; RENOU et al., 2008).

Diante disso, este trabalho busca avaliar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas que circundam o Aterro Sanitário de Belo Horizonte, considerando aspectos espaciais, temporais, normativos e estatísticos. A pesquisa estrutura-se pela análise detalhada dos dados de monitoramento, sendo PSP - Pontos Superficiais, PE - Pontos Extras de Água Superficial e PM - Pontos de Monitoramento Subterrâneo, apoiada em mapas oficiais do aterro, documentos técnicos e literatura técnica, buscando identificar tendências, possíveis áreas críticas e implicações ambientais para a sub-bacia do Córrego Ressaca, contribuindo para a gestão ambiental do município de Belo Horizonte e para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre a interação entre aterros sanitários e recursos hídricos.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da presença do aterro sanitário desativado de Belo Horizonte sobre a qualidade das águas subterrâneas e superficiais da região onde este encontra-se implantado.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as análises dos parâmetros físico-químicos e biológicos das águas subterrâneas e superficiais coletadas nos diferentes pontos de monitoramento do aterro, verificando variações de qualidade ambiental.
- Identificar e mapear as áreas com maior suscetibilidade à contaminação, considerando o comportamento hidrogeológico local e os resultados das análises dos pontos monitorados.
- Interpretar os possíveis impactos decorrentes da influência dos lixiviados na bacia hidrográfica do entorno do aterro.

3. JUSTIFICATIVA

A disposição final de resíduos sólidos urbanos continua representando um desafio ambiental significativo, especialmente em regiões densamente urbanizadas, onde a vulnerabilidade hídrica é elevada. No caso do antigo Aterro Sanitário BR-040, a geração e a possível percolação de lixiviados adquirem relevância particular, uma vez que o esgoto apresenta elevada carga orgânica, nitrogênio, sólidos dissolvidos e outros compostos potencialmente tóxicos, capazes de alterar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (SANTOS ET AL., 2020). A infiltração de lixiviado em áreas sem controle adequado pode acarretar alterações expressivas nos parâmetros físico-químicos das águas e exigir monitoramento contínuo (ARAÚJO et al., 2022) Além disso, parte do aterro operou em décadas passadas sem sistemas de impermeabilização, aumentando a susceptibilidade à contaminação de nascentes e cursos d'água presentes na sub-bacia do Córrego Ressaca, classificada como água doce Classe 2 conforme COPAM (1997).

Diante dessa realidade, torna-se essencial avaliar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas que drenam o entorno do empreendimento, considerando a importância ambiental, sanitária e social dessa microbacia para os bairros adjacentes. A análise dos dados provenientes dos pontos de monitoramento (PSP, PE e PM) permite identificar

tendências, áreas críticas e possíveis evidências de percolação de lixiviados, fornecendo subsídios técnicos para o aprimoramento da gestão ambiental.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Caracterização e Composição do Lixiviado

A gestão de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU é um desafio persistente nas sociedades modernas, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, onde o crescimento desordenado e a precariedade dos serviços públicos de saneamento agravam o cenário. Um dos produtos mais preocupantes da disposição inadequada de resíduos é o lixiviado, cuja formação ocorre pela ação combinada da decomposição da matéria orgânica e da infiltração da água da chuva nas camadas de resíduos compactados dos aterros (ABREMA, 2023).

O lixiviado é reconhecido como um efluente de elevada complexidade, com características físico-químicas e biológicas variáveis, dependendo da idade do aterro, do tipo de resíduo depositado e das condições climáticas e operacionais. A composição típica do lixiviado como contendo altos teores de matéria orgânica biodegradável (expressa pela DQO e DBO), metais pesados como chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e níquel (Ni), nutrientes como nitrogênio amoniacal e fósforo, além de compostos tóxicos como HPAs, compostos fenólicos, solventes orgânicos e uma carga microbiológica significativa com presença de coliformes fecais e organismos patogênicos (KJELDSEN et al. 2002).

A presença desses componentes representa uma ameaça significativa à qualidade do solo e da água, podendo resultar em processos de eutrofização, acidificação, salinização, bioacumulação de metais em organismos aquáticos e disseminação de doenças de veiculação hídrica (SANTOS et al., 2020; ARAÚJO et al., 2022).

4.2 Impactos Ambientais no Solo e nas Águas

A infiltração de lixiviado nos compartimentos ambientais representa uma das formas mais graves de contaminação difusa. Uma vez no solo, o lixiviado pode alterar sua composição físico-química, promovendo a acidificação e a mobilização de metais pesados anteriormente retidos nas frações argilosas. Segundo Silva et al. (2021), o solo contaminado por lixiviado sofre perdas significativas de matéria orgânica e de Capacidade de Troca Catiônica (CTC), o que prejudica sua fertilidade e a atividade biológica essencial à ciclagem de nutrientes.

Do ponto de vista hídrico, a contaminação das águas superficiais e subterrâneas ocorre por meio da migração descendente do lixiviado, principalmente em áreas de recarga aquífera e solos altamente permeáveis. Essa contaminação pode levar à presença de substâncias tóxicas nos aquíferos, dificultando ou inviabilizando seu uso para abastecimento humano, irrigação ou dessedentação animal. Mesmo após o encerramento das atividades de um aterro, os efeitos do lixiviado podem persistir por décadas, exigindo monitoramento contínuo (FARIA et al., 2020).

4.3 Riscos à Saúde Pública

A exposição da população ao lixiviado pode ocorrer por meio do contato direto com solos contaminados, da ingestão de água contaminada ou da inalação de compostos voláteis. Existem riscos à saúde humana caso haja consumo de fontes alternativas de água (poços e minas) não protegidas por sistemas de tratamento (LOPES et al., 2022).

A presença de coliformes termotolerantes, *Escherichia coli* e outros agentes patogênicos em águas contaminadas por lixiviado está associada a doenças de veiculação hídrica (LOPES et al., 2022; FARIA et al., 2020). A presença de metais pesados pode desencadear efeitos neurológicos, nefrotóxicos e até mesmo cancerígenos com o passar dos anos.

Além dos efeitos diretos, a contaminação ambiental afeta a segurança alimentar e a economia, uma vez que desvaloriza imóveis e restringe o uso do solo e da água para atividades de subsistência. Tais impactos reforçam a necessidade de ações de remediação integradas e políticas públicas que incluem mapeamento de áreas vulneráveis, acompanhamento epidemiológico e educação ambiental (ARAÚJO, 2022).

4.4 Aterros brasileiros

Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei nº 12.305/2010) estabelecer diretrizes claras para o manejo adequado dos resíduos, a realidade brasileira ainda é marcada por falhas estruturais nos aterros. Muitas dessas unidades não possuem sistemas adequados de impermeabilização com geomembranas, drenagem de gases e líquidos.

A sobrecarga de resíduos, as manutenções das células de disposição e a drenagem ineficiente de lixiviado são fatores que necessitam de cuidados corretivos e preventivos a fim de não comprometer a integridade ambiental dos aterros, principalmente em períodos de chuvas intensas (SILVA & ALMEIDA, 2021). Mantas de vedação em bases ou taludes

impedem a infiltração do lixiviado, dificultando sua chegada ao lençol freático (LIMA et al., 2023).

A articulação entre os órgãos ambientais e os municípios, aliada a recursos técnicos e financeiros, contribui para a prevenção do problema, especialmente nas periferias urbanas e áreas com ocupação irregular.

4.5 Ferramentas e Técnicas de Monitoramento

O cruzamento entre dados de vulnerabilidade hidrogeológica, uso do solo e presença de aquíferos permite a identificação de zonas críticas para intervenção. Técnicas de geofísica, como eletrorresistividade e polarização induzida, também têm sido utilizadas para detectar plumas de contaminação não visíveis à superfície, com bom grau de precisão (COSTA ET AL., 2021).

Essas ferramentas devem ser acompanhadas por planos de amostragem bem elaborados e por métodos normalizados pela ABNT, como a NBR 9898/2017, que orienta a coleta, preservação e transporte de amostras ambientais.

4.6 Legislação Ambiental e Padrões de Qualidade

A avaliação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas no entorno de aterros sanitários deve estar fundamentada em normas e legislações federais, estaduais e municipais, que estabelecem critérios técnicos para a proteção dos recursos hídricos e da saúde pública. As exigências normativas são essenciais para interpretação dos dados de monitoramento ambiental, para estabelecimento de padrões de qualidade e avaliação do grau de risco ambiental e sanitário associado à percolação de líquidos lixiviados.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece a classificação dos corpos de água superficiais com base nos usos preponderantes, determinando padrões de qualidade compatíveis com cada classe. Conforme a norma, as águas doces são classificadas segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes (BRASIL, 2005). O enquadramento dos corpos hídricos visa assegurar que a qualidade da água seja compatível com usos mais restritivos, como o abastecimento público e a preservação da vida aquática, permitindo identificar alterações decorrentes de impactos ambientais, incluindo aqueles associados à disposição final de resíduos sólidos urbanos.

No que se refere às águas subterrâneas, a Resolução CONAMA nº 396/2008 define diretrizes para sua classificação e proteção, reconhecendo sua importância para avaliação estratégica de impactos. De acordo com a resolução, as águas subterrâneas devem ser protegidas de forma a assegurar sua qualidade para os usos atuais e futuros, garantindo a sustentabilidade do recurso (BRASIL, 2008). Além disso, a norma enfatiza o caráter preventivo da gestão dos aquíferos, uma vez que impactos negativos à água subterrânea apresentam difícil reversibilidade.

A Lei Federal nº 6.938/1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), estabelece como princípio a prevenção e o controle da poluição ambiental, determinando que atividades potencialmente poluidoras estejam sujeitas ao controle e ao monitoramento ambiental. A lei define que o poluidor é obrigado a prevenir e corrigir danos ambientais, sendo o acompanhamento da qualidade dos recursos hídricos um dos principais instrumentos para esse controle (BRASIL, 1981).

Ainda na esfera de legislações federais aplicada a gestão de recursos hídricos, a Lei Federal nº 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelece que a gestão das águas deve ser descentralizada e baseada no conhecimento da quantidade e qualidade dos recursos hídricos disponíveis. Essa lei reforça a necessidade de sistemas de monitoramento como subsídio à gestão das águas superficiais e subterrâneas, especialmente em bacias hidrográficas sujeitas a pressões antrópicas.

No contexto específico de resíduos sólidos, a Lei Federal nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), determina que a disposição final de rejeitos deve ocorrer de forma ambientalmente adequada, o que inclui o controle e o monitoramento dos impactos sobre o solo e os recursos hídricos. Para aterros sanitários, essa exigência se traduz na obrigatoriedade do monitoramento contínuo das águas superficiais e subterrâneas durante a operação e após o encerramento das atividades.

Em nível estadual, destaca-se a Deliberação Normativa COPAM nº 20/1997, do Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais, que dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água e estabelece padrões de qualidade para as águas superficiais no estado, definindo classes de qualidade das águas e limites para parâmetros físicos, químicos e biológicos, sendo amplamente utilizada em estudos ambientais e relatórios técnicos, especialmente em análises comparativas e séries históricas de monitoramento iniciadas antes da vigência da norma federal (MINAS GERAIS, 1997).

No âmbito da saúde pública, a Portaria GM/MS nº 888/2021 regulamenta os padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano, estabelecendo limites máximos permitidos para parâmetros microbiológicos, físico-químicos e substâncias químicas potencialmente nocivas à saúde. Conforme definido na portaria, a água destinada ao consumo humano deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos nesta Portaria e não oferecer riscos à saúde (BRASIL, 2021). Essa normativa é referência fundamental para a avaliação sanitária de águas subterrâneas e superficiais com potencial uso para abastecimento humano.

4.7 Processos de Impermeabilização em Aterros Sanitários

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece que a disposição final deve ocorrer de forma ambientalmente adequada, incluindo medidas de controle e proteção do meio físico. A disposição final ambientalmente adequada de rejeitos observa normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos conforme Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010).

Evidenciando a importância da impermeabilização de base e a cobertura final dos aterros sanitários, a ABNT NBR 13896 estabelece critérios para o projeto, implantação e operação de aterros, definindo que os aterros devem possuir sistemas de proteção ambiental capazes de restringir a migração de contaminantes. Conforme a norma, o sistema de impermeabilização deve ser projetado de modo a reduzir a percolação de líquidos gerados no aterro para o solo e para as águas subterrâneas (ABNT, 1997).

A função primordial da impermeabilização de base é impedir a migração do lixiviado para o subsolo e aquíferos adjacentes, constituindo a principal barreira de proteção ambiental do aterro (BOSCOV, 2008). A camada de solo argiloso compactado é amplamente utilizada como barreira natural, devido à sua baixa permeabilidade hidráulica e elevada capacidade de retenção de contaminantes. Solos argilosos adequadamente compactados podem apresentar coeficientes de permeabilidade da ordem de 10^{-7} a 10^{-9} cm/s, sendo considerados adequados para sistemas de impermeabilização de base (BOSCOV, 2008).

A utilização de geomembranas poliméricas, especialmente de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), é uma prática consolidada em projetos de aterros sanitários no Brasil. Essas geomembranas apresentam elevada resistência química aos compostos presentes no lixiviado e baixíssima permeabilidade, funcionando como barreira praticamente

impermeável.

No contexto da cobertura final, esta tem como principal objetivo reduzir a infiltração de águas pluviais no maciço de resíduos, diminuindo a geração de lixiviado e, consequentemente, o potencial de contaminação ambiental (CASTILHOS JUNIOR et al., 2006).

Do ponto de vista construtivo, a impermeabilização final é geralmente composta por um sistema multicamadas, que inclui camada de regularização, barreira impermeável constituída por solo argiloso compactado e/ou geomembrana, camada drenante, camada de proteção e solo vegetal. A camada de argila compactada apresenta baixa permeabilidade hidráulica e atua como barreira natural à infiltração, enquanto a geomembrana confere elevada estanqueidade ao sistema (BOSCOV, 2008). A camada impermeável da cobertura final é responsável por controlar o fluxo descendente de água, sendo determinante para o desempenho ambiental do aterro após o encerramento (BOSCOV, 2008).

A ausência ou deficiência desses sistemas resulta em aumento da mobilidade do lixiviado, causando impactos ambientais e maior persistência dos passivos no período pós-encerramento do aterro (ABREMA, 2023).

5. METODOLOGIA

5.1 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo foi o aterro sanitário desativado de Belo Horizonte/MG, que integra a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos BR-040 (CTRS BR-040), localizado no bairro Jardim Filadélfia, na Região Noroeste do município. Esse empreendimento representou a transição do município para um sistema mais estruturado de disposição final de resíduos. A Prefeitura de Belo Horizonte informa que o aterro sanitário de Belo Horizonte, inaugurado em fevereiro de 1975, às margens da rodovia BR-040, na região Noroeste da capital, funcionou como principal destino dos resíduos da cidade durante mais de três décadas (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2018).

Desde dezembro de 2007, o local não recebe mais os resíduos sólidos urbanos de Belo Horizonte, marcando o encerramento oficial de suas atividades de disposição (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2018).

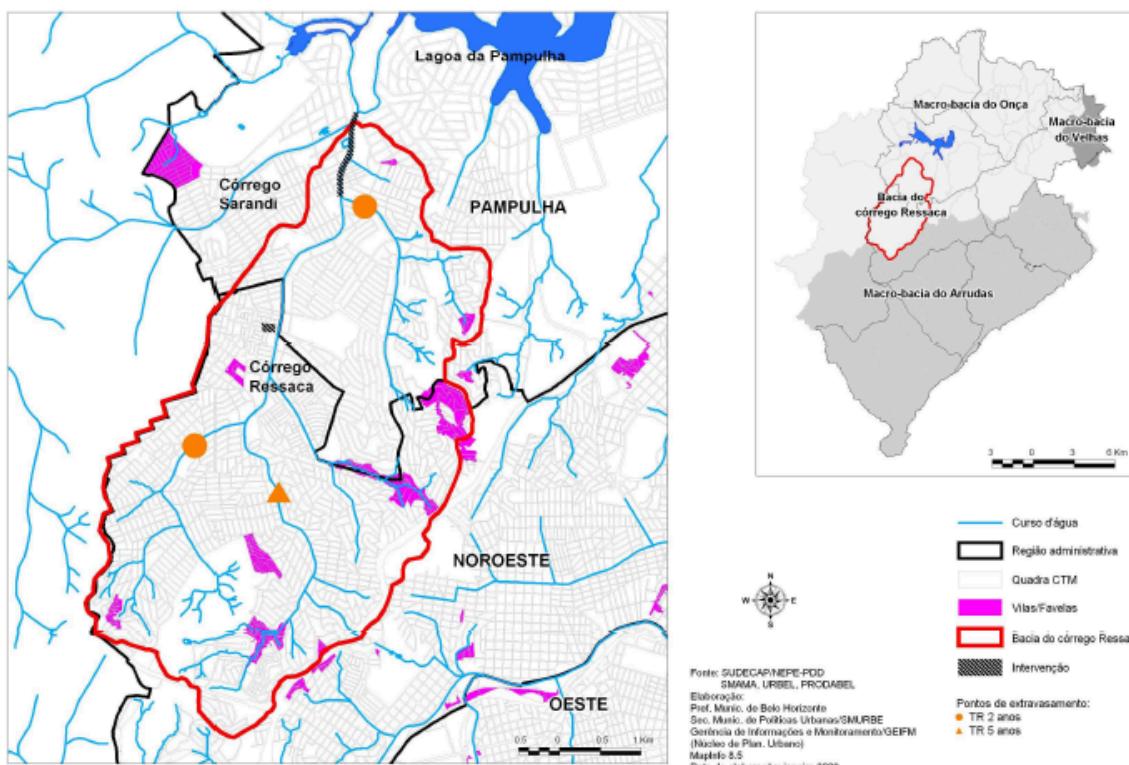
Figura 5.1 - Foto da área impermeabilizada do aterro sanitário 0-40



Fonte: Autora, 2025.

O aterro possui uma área total de 114,9 hectares e está inserida na bacia hidrográfica do rio das Velhas, sub-bacia hidrográfica do córrego Ressaca, contribuinte da lagoa da Pampulha (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2018).

Figura 5.2 - Mapa da Bacia do Córrego Ressaca e nascentes na área do Aterro 0-40

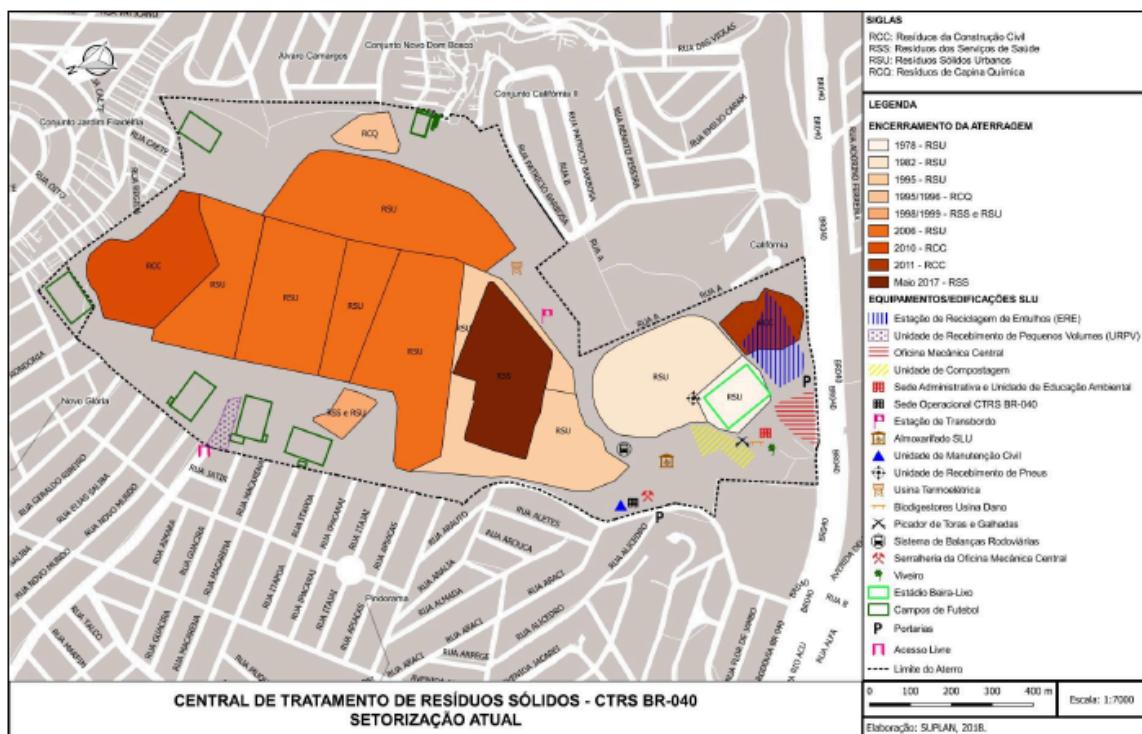


Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte, [s/d]

No entorno da área da CTRS BR-040 identificam-se 12 bairros, que podem ser considerados como população de influência e beneficiada diretamente pelo equipamento público. Este conjunto de bairros apresenta uma população que equivale a uma cidade de porte médio, com cerca de 70.000 habitantes, correspondente a 3% do total da população do município de Belo Horizonte, conforme Dados do Censo Demográfico de 2010/IBGE (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2018).

Após o encerramento do aterro sanitário da BR-040, no ano de 2007, as demais atividades realizadas na área de abrangência da CTRS BR-040 continuaram em funcionamento, sendo elas: Unidade de Compostagem; Viveiro de mudas; Célula Especial para aterragem de Resíduos de Serviços de Saúde, encerrada em maio de 2017; Unidade de Transbordo, com operação interrompida em 2016; Estação de Reciclagem de Entulho; Unidade de Recebimento de Pneus – URP; Central de Aproveitamento Energético do Biogás, Divisão de Manutenção de Veículos, Almoxarifado, Unidade de Educação Ambiental e edificações para desenvolvimento das atividades técnico-administrativas relacionadas ao Departamento de Tratamento e Destinação Final de Resíduos, dentre as quais se destaca a antiga usina DANO para o beneficiamento do resíduo (PREFEITURA DE BELO HORIZONTE, 2018).

Figura 5.3 - Mapa de setorização da CTRS BR-040



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 2008

Considerando o processo de ampliação do aterro visando o atendimento da sociedade, a unidade possui apenas uma parcela de área impermeabilizada com argila compactada, sendo a célula principal do aterro, estabelecidas como AC-03, AC-04 e AC-05, conforme Figura 3.4, o que influencia diretamente na qualidade das águas superficiais e subterrâneas da região, visto que as demais áreas que também recebiam RSU para aterramento não possuem impermeabilização de base e final.

O Aterro Sanitário de Belo Horizonte é um caso emblemático dos desafios enfrentados por grandes centros urbanos na gestão de resíduos sólidos. Mesmo após o encerramento da sua operação, ainda há risco de contaminação ambiental devido à permanência de resíduos enterrados e à continuidade da geração de lixiviado em virtude da degradação lenta dos materiais orgânicos.

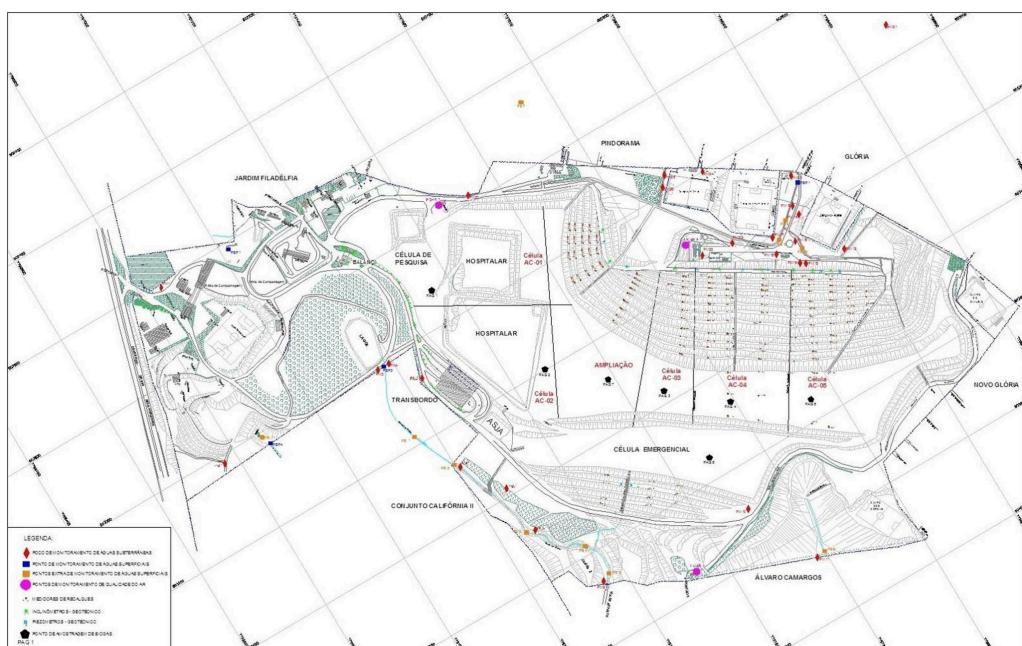
O sistema de contenção de lixiviado do aterro apresenta deficiências que se agravam no período de chuvas, levando ao extravasamento e à percolação de líquidos para o solo (PEREIRA et al., 2023). Por meio de estudos de eletrorresistividade, identificaram zonas de baixa resistividade elétrica, o que pode indicar a presença de líquidos em subsuperfície, possivelmente relacionados à migração de lixiviado (BACELLAR E CATAPRETA, 2023).

A área de influência do aterro inclui presença de comunidades ao entorno e corpos hídricos afluentes do Ribeirão Arrudas, que por sua vez conflui com o Rio das Velhas.

5.2 Descrição e Localização dos Pontos de Monitoramento

O sistema de monitoramento hidroambiental apresentado na planta do Aterro Sanitário de Belo Horizonte evidencia uma rede bem distribuída de pontos destinados ao acompanhamento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, implantados ao redor de toda área do aterro, contando com áreas de disposição de resíduos, áreas operacionais, unidades administrativas, lazer e pontos localizados nos bairros vizinhos, e, para melhor visualização, o mesmo arquivo encontra-se no Anexo I.

Figura 5.4 - Mapa de pontos de monitoramento de águas superficiais e subterrâneas



Fonte: Acervo SLU, [s/d]

Devido à sua localização, o aterro sanitário de Belo Horizonte/MG, pode, eventualmente, impactar 3 (três) córregos que se encontram presentes na área, sendo eles: Ipanema, Coqueiros e Taiobas (Figura 5.5). Esses córregos são microbacias do Córrego Ressaca, portanto é de suma importância a realização frequente da coleta e análise de amostras de suas águas superficiais, pois são interceptores de fluxo de poluentes (CATAPRETA, 2021).

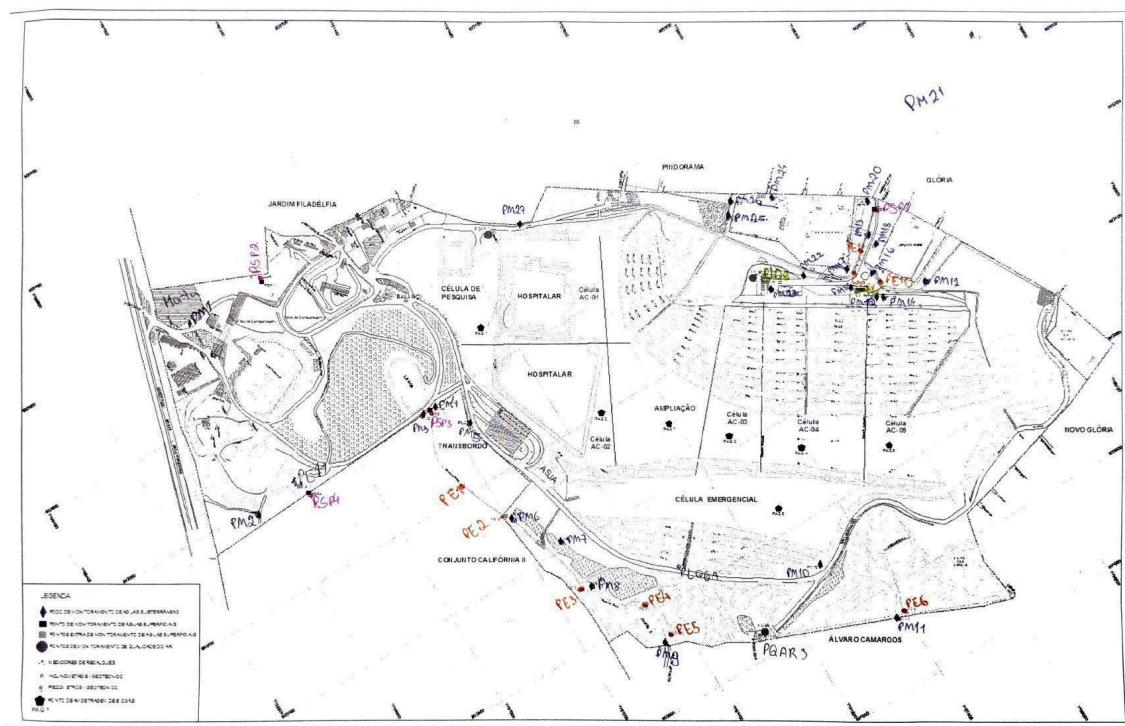
Figura 5.5 – Fotos do Córrego Coqueiros, Lagoa e canalização do Córrego Taiobas



Fonte: Autora, 2025

Para melhor compreensão e análise dos resultados, a SLU disponibilizou os pontos de monitoramento caracterizados, nomeados e numerados (Figura 5.6) e, para melhor visualização, o mesmo arquivo encontra-se no Anexo II. Os pontos de monitoramento de Água Superficial contam com 4 (quatro) PSPs - Ponto Superficial e 10 (dez) PEs. Os pontos de monitoramento de Água Subterrânea são definidos em PM - Ponto de Monitoramento, totalizando 27 (vinte e sete) pontos.

Figura 5.6 - Mapa de distribuição dos Pontos de Monitoramento e sua Caracterização.



Fonte: Acervo SLU, [s/d]

5.2.1 Pontos de Superfícias (PSP)

A rede de monitoramento superficial é formada pelos pontos PSP 1, PSP 2, PSP 3, PSP 4 e pela Lagoa. Devido à sua localização, o aterro pode impactar diretamente os córregos Coqueiros, Taiobas e Ipanema (CATAPRETA et al., 2021).

• PSP 1 – Córrego Coqueiros

Localizado à jusante da célula principal impermeabilizada, sendo Ampliação, AC-03, AC-04 e AC-05. São os pontos para avaliar a eficiência da impermeabilização de base;

- PSP 2 – Ponto fora da área do aterro

Trata-se do ponto de monitoramento do córrego Taiobas à montante da área de aterramento, no qual sofre com lançamento de esgoto pela comunidade local;

• PSP 3 – Córrego Taiobas

Situado imediatamente após a Lagoa, formada sobre área de antigo aterro sem impermeabilização entre os anos de 1962 à 1978;

- PSP 4 – Córrego Ipanema

Também localizado em setor de disposição antiga, próximo ao PE 11 e ao PM 2; e

- **Lagoa**

Ponto onde nascentes emergem sobre área antes ocupada por resíduos. A Lagoa forma o córrego Taiobas mais à jusante.

5.2.2 Pontos Extras de Água Superficial (PE)

Os pontos PE 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 e 11 permitem maior detalhamento ao longo dos cursos de água dos córregos. Quanto ao PE 7, este se encontra desativado pois está inserido em área particular. Se destaca as características locacionais de cada ponto:

- PE 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem a área do córrego Taiobas;
- PE 8, PE 9 e PE 10, que se situam sobre a área impermeabilizada e na mesma direção de fluxo do PSP 1; e
- PE 11, localizado na área de aterro antigo próximo ao PSP.

5.2.3 Pontos de Monitoramento Subterrâneo (PM)

A rede de PMs acompanha todo o perímetro da CTRS. Os poços PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1, PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3, PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19, PM20.1, PM20.2, PM20.3, PM21, PM23 se localizam na área impermeabilizada, junto ao PSP 1 e aos PE 8–10. Já os PM3, PM4, PM5 e PM2 localizam-se próximos às áreas de antigo aterro sem impermeabilização, próximos à Lagoa, PSP 3 e PSP 4.

5.3 Coleta, tratamento e organização dos dados

As análises deste estudo foram realizadas a partir das planilhas fornecidas pela Superintendência de Limpeza Urbana (SLU) de Belo Horizonte, contendo resultados de monitoramento das águas subterrâneas e superficiais no período de 2020 a 2025. A metodologia de análise dos dados foi estruturada conforme os períodos amostrais apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 5.1 – Períodos de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas

| Meio hídrico | Tipo de ponto de monitoramento | Meses e anos |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Água superficial | PSPs e Lagoa | Abr e Out/2020 |
| | | Jun e Nov/2021 |
| | | Mai e Out/2022 |
| | | Jun e Out/2023 |
| | | Mai e Out/2024 |
| | | Fev e Ago/2025 |
| Água superficial | PEs | Jan e Jul/2020 |
| | | Jan e Jul/2021 |
| | | Jan e Jul/2022 |
| | | Jan e Jul/2023 |
| | | Jan e Jul/2024 |
| | | Jan e Jul/2025 |
| Água subterrânea | PMs | Jul e Out/2020 |
| | | Jul e Out/2021 |
| | | Jul e Out/2022 |
| | | Jul e Out/2023 |
| | | Jul e Out/2024 |
| | | Jan e Abr/2025 |

Fonte: Autora, 2025

Os parâmetros analisados para as águas superficiais incluíram pH, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, turbidez, cloretos, nitrogênio amoniacal, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), oxigênio dissolvido (OD), coliformes totais e *Escherichia coli*.

Para as águas subterrâneas, foram avaliados turbidez, coliformes totais e termotolerantes, DBO, DQO e oxigênio dissolvido, com a inclusão específica do parâmetro manganês no ponto PM21, com o objetivo de verificar a possível ocorrência de contaminação do aquífero por metal potencialmente tóxico, associada à percolação de líquidos lixiviados.

5.4 Análises Estatísticas e Gráficas

As análises estatísticas foram realizadas a partir das planilhas de dados de Água Superficial e Subterrânea fornecidas pela Superintendência de Limpeza Urbana - SLU,

conforme Apêndice I e IIc, respectivamente. Foi incluída a construção de séries temporais, comparações diretas com os Valores Máximos Permitidos - VMP das normas e elaboração de gráficos para cada parâmetro em cada ponto de monitoramento. Sendo importante destacar que, embora os gráficos em algumas análises de parâmetros indiquem linhas de análise próximas a 0, nenhum parâmetro atingiu nível absoluto de ausência de concentração de determinados parâmetros. Isto ocorreu devido às grandes escalas de concentração entre os máximos e mínimos variados no tempo.

A relação DBO/DQO foi usada como indicador de biodegradabilidade, conforme Von Sperling (2014), no qual estabelece que relação DBO/DQO inferior a 0,3 indica presença predominante de matéria orgânica recalcitrante, aspecto determinante na avaliação de influência de lixiviados.

Também foi aplicada a Análise de Agrupamentos (Cluster Analysis), que permitiu identificar padrões de similaridade entre pontos. A Análise de Cluster, também denominada análise de agrupamentos, consiste em uma técnica estatística multivariada cujo objetivo é agrupar unidades de observação com base em suas semelhanças, de forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo apresentem maior similaridade entre si do que em relação aos elementos de outros grupos. Essa metodologia é amplamente utilizada em estudos ambientais, geográficos e hidroambientais para identificar padrões espaciais e comportamentais em conjuntos complexos de dados (BRAZ et al., 2020).

A representação gráfica dos resultados da análise hierárquica é realizada por meio do dendrograma, que consiste em um diagrama em forma de árvore. Nesse gráfico, o eixo vertical representa os níveis de dissimilaridade entre os agrupamentos, enquanto o eixo horizontal indica as unidades analisadas. A altura dos ramos do dendrograma expressa o grau de similaridade entre os clusters formados, permitindo visualizar claramente os pontos ou áreas que apresentam comportamentos ambientais semelhantes (BRAZ et al., 2020).

Os resultados separam claramente os pontos de água superficiais da área impermeabilizada, sendo: PSP 1, PE 8, PE 9 e PE 10, e pontos de água subterrânea, sendo: PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1, PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3, PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19, PM20.1, PM20.2, PM20.3, PM21, PM23, PM 24, PM 25 e PM26 dos demais pontos em áreas antigas sem impermeabilização de base. Agrupamentos tendem a refletir a influência espacial e operacional da disposição de

resíduos no comportamento hidroquímico da água (SHINZATO, 2012).

5.5 Comparação Normativa

A comparação dos resultados analisados utilizou como referências principais as normativas do CONAMA para águas superficiais e águas subterrâneas, definindo, conforme estabelecido por norma, o Valor Máximo Permitido para os parâmetros que obtém limites de tolerância, separando-as da seguinte forma:

Para águas superficiais:

- CONAMA 357/2005, Classe 2 – parâmetros físicos, químicos e microbiológicos;
- Deliberação Normativa COPAM 20/1997, para enquadramento hidrográfico.

Para águas subterrâneas:

- CONAMA 396/2008, valores de referência de qualidade;
- Portaria GM/MS 888/2021, como apoio interpretativo para parâmetros microbiológicos e químicos.

Os valores normativos foram associados aos gráficos por meio de linhas de referência Valor Máximo Permitido - VMP, permitindo interpretação clara das ultrapassagens e comportamento temporal.

6. RESULTADOS

Os resultados apresentados nos tópicos seguintes contemplam a avaliação do atendimento aos padrões legais de qualidade da água nos pontos de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas, considerando os parâmetros físico-químicos e biológicos analisados. Esses resultados também subsidiam a identificação de indícios de alterações da qualidade dos recursos hídricos devido à presença do aterro sanitário desativado de Belo Horizonte, a delimitação de áreas potencialmente mais suscetíveis ao impacto, bem como a interpretação da natureza e da origem das fontes poluidoras, à luz do comportamento hidrogeológico local e dos possíveis riscos ambientais e sanitários para a bacia hidrográfica onde o aterro está inserido.

A sub-bacia do córrego Ressaca, localizada no município de Belo Horizonte e pertencente à Sub-Bacia do Ribeirão da Onça, encontra-se enquadrada como corpo d'água Classe 2, devendo atender aos padrões definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. A

normativa estabelece que:

“águas doces de Classe 2 são aquelas destinadas ao abastecimento humano após tratamento convencional, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário e irrigação” (CONAMA 357/2005)

No âmbito estadual, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 (MINAS GERAIS, 2008) reforça que os corpos d’água devem “manter ou alcançar padrões de qualidade compatíveis com seus usos preponderantes”, integrando padrões nacionais e estaduais na gestão dos recursos hídricos.

A área do empreendimento é de extrema sensibilidade ambiental por estar inserida em região de nascentes, onde as águas superficiais possuem baixa capacidade de diluição e respondem rapidamente a alterações estruturais e de manejo.

6.1 Análise da Qualidade das Águas Superficiais

Essa análise foi realizada para verificar as condições do comportamento dos pontos monitorados. Os pontos instalados sobre a área impermeabilizada (PSP 1, PE 8, PE 9, PE 10) apresentam melhor desempenho para diversos parâmetros, embora tenham apresentados resultados que merecem atenção, enquanto os pontos em setores não impermeabilizados (PSP 3, PSP 4, PE 1–PE 6 e PE 11) exibem valores superiores, compatíveis com cenários que sugerem o possível transporte superficial de contaminantes.

Nessa análise, deve-se considerar que devido ao aporte de material orgânico, proveniente de lançamento de esgoto doméstico a montante do aterro, assim como o carreamento de folhas de árvores (matéria orgânica em decomposição) e a presença de um chiqueiro ao longo do córrego Taiobas, o que pode estar contribuindo para as alterações verificadas. Alie-se a isto, o fato de que a área desse aterro é rotineiramente frequentada por animais de grande porte.

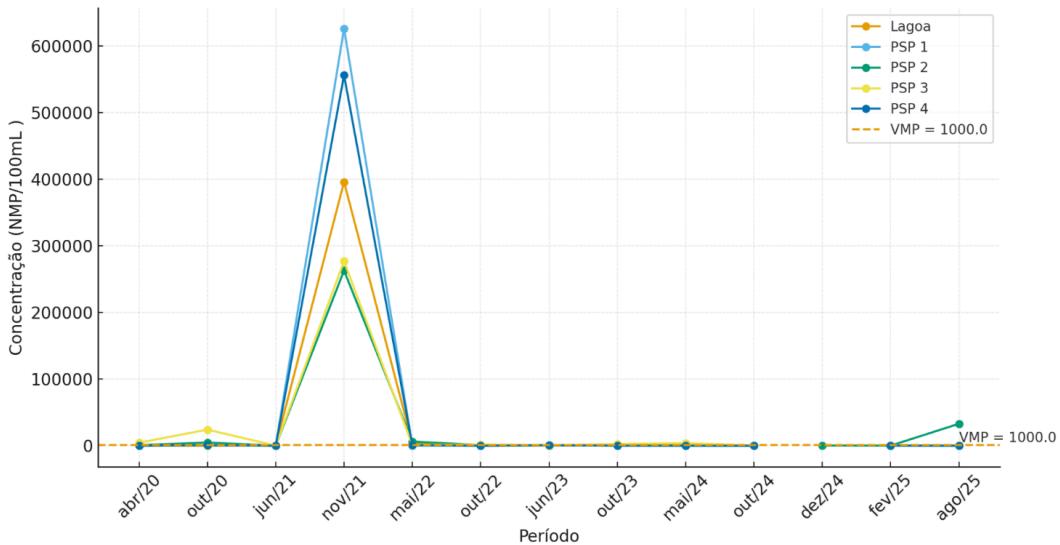
A seguir, foram avaliados os parâmetros dos PSPs e Lagoa e, subsequentemente, dos PEs, conforme dados e informações complementares fornecidas pela SLU.

*6.1.1 Coliformes Termotolerantes (*E. Coli*)*

A Figura 6.1 apresenta a variação temporal da concentração de coliformes

termotolerantes nos pontos de monitoramento de água superficial (PSP 1, PSP 2, PSP 3 e PSP 4) e na lagoa. Destaca-se que, apesar do gráfico demonstrar períodos com valores próximos à zero, houve presença de coliformes termotolerantes em todos os pontos ao longo da série histórica, conforme dados originais analisados. A amplitude da escala do eixo vertical é fortemente influenciada pelos valores máximos obtidos, especialmente em novembro de 2021, o que faz com que as concentrações observadas nos demais períodos aparentam ser próximas de zero.

Figura 6.1 - Concentração de Coliformes Termotolerantes (E. Coli) nos PSPs e Lagoa



Fonte: Autora, 2025

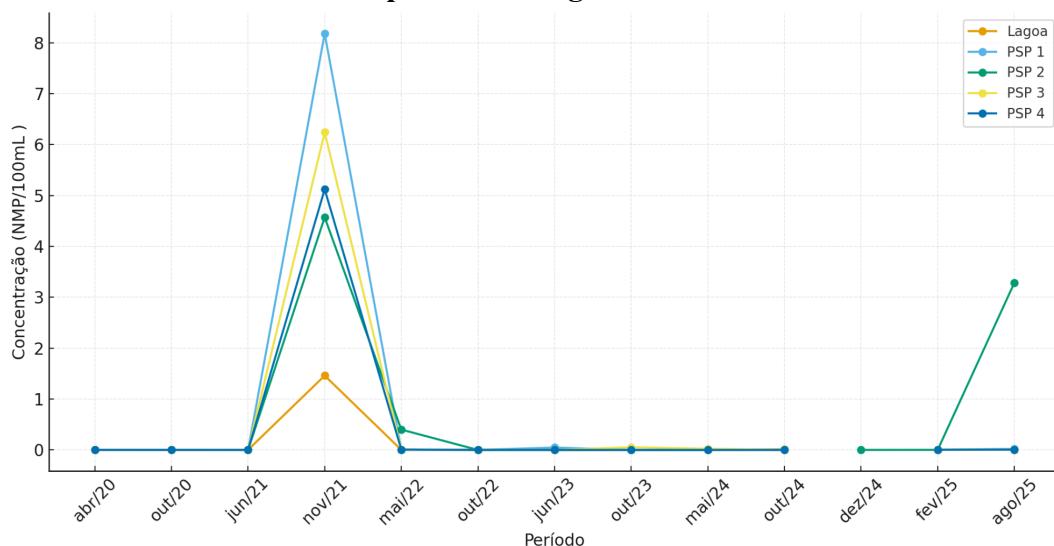
Os resultados obtidos ao longo dos meses analisados evidenciam um padrão temporal predominantemente contínuo e estável das concentrações de coliformes termotolerantes, com variações relativamente próximas entre si na maior parte da série histórica. Destaca-se, um evento isolado de elevação expressiva das concentrações em novembro de 2021, quando todos os pontos de monitoramento apresentaram aumento simultâneo de

coliformes termotolerantes, caracterizando um episódio específico de maior aporte microbiológico. Este comportamento pode estar associado a condições hidrológicas excepcionais, como eventos de chuva intensa, comuns no período chuvoso da região, que podem favorecer o carreamento superficial de matéria orgânica, sedimentos e microorganismos para os corpos hídricos.

6.1.2 Coliformes Totais

De forma análoga ao observado anteriormente para os coliformes termotolerantes, os resultados de coliformes totais apresentam o mesmo padrão de comportamento ao longo do período analisado. Verifica-se a presença contínua do parâmetro em todos os meses monitorados. Assim, a interpretação dos resultados de coliformes totais segue a mesma lógica adotada para os coliformes termotolerantes.

Figura 6.2 - Concentração de Coliformes Totais nos Pontos de Monitoramento Superficial e Lagoa



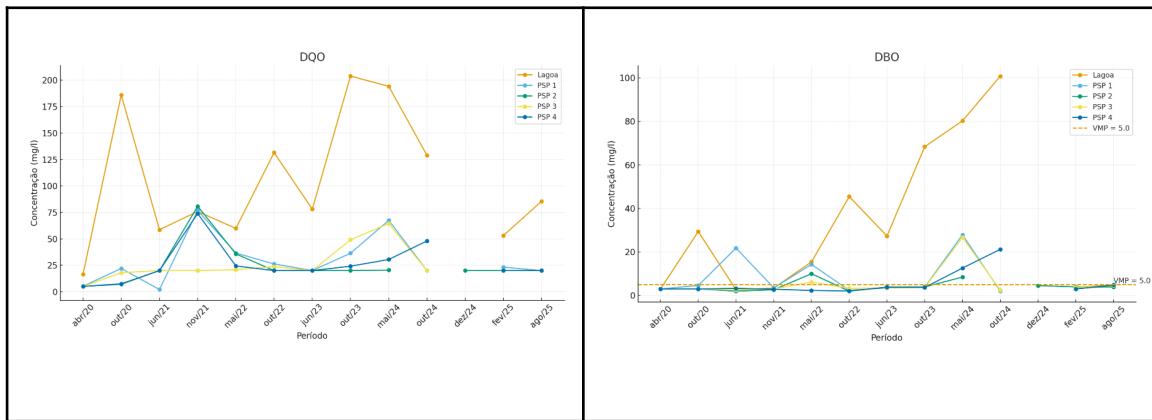
Fonte: Autora, 2025

6.1.3 DBO e DQO

A Figura 4.3 apresenta as concentrações de DBO e DQO ao longo do período analisado. Os valores de DBO mantiveram próximos o Valor Máximo Permitido (VMP), com variações expressivas na Lagoa. Estas grandes alterações podem estar associadas às condições físicas que o local possui, como árvores de grande porte e presença frequente de animais na região, aumentando processos de biodegradação da matéria orgânica. Além

deste, a lagoa está localizada na área onde funcionava um aterro convencional (lixão).

Figura 6.3 - Concentração de DBO e DQO



Fonte: Autora, 2025

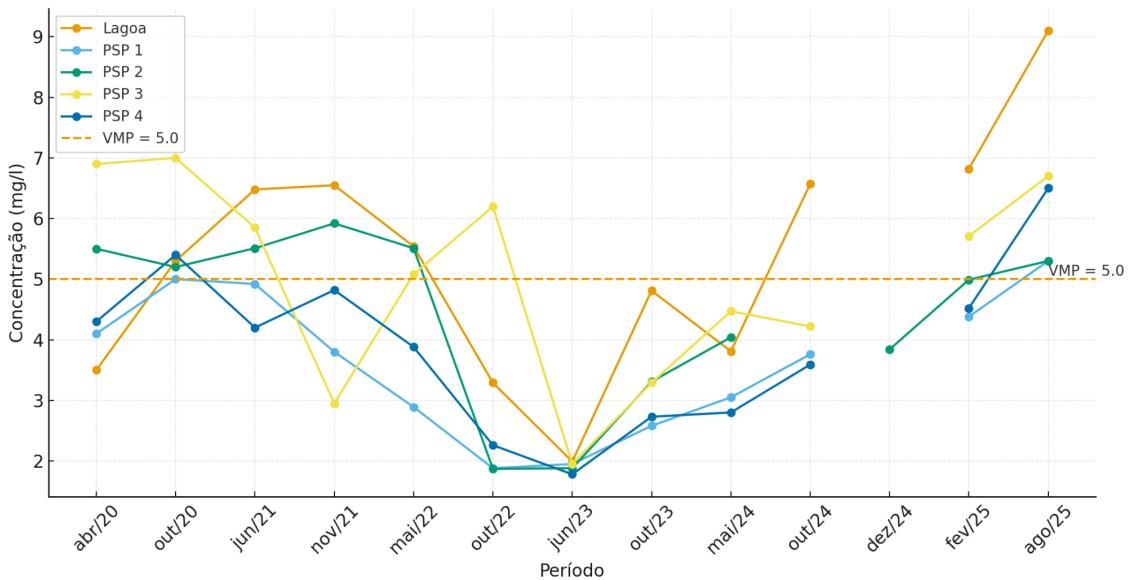
A análise integrada de DBO/DQO indica a influência de substâncias orgânicas e inorgânicas oxidadas quimicamente, indicativas de compostos recalcitrantes e, em diversos casos, relacionados à presença de matéria orgânica não biodegradável, podendo este estar relacionado a condição original da lagoa (aterro convencional).

6.1.4 Oxigênio Dissolvido

Observa-se que, na maior parte da série histórica, os valores de OD oscilaram em torno do limite estabelecido. Contudo, um comportamento atípico no mês de junho de 2023, no qual todos os pontos, incluindo a lagoa, apresentaram uma redução simultânea das concentrações de OD. Para o mês de dezembro 2024, houve avaliação apenas para PSP2.

Embora outubro seja caracterizado como um mês tipicamente chuvoso na região, os resultados não apontam uma relação direta e consistente entre o período chuvoso e a redução das concentrações de OD.

Figura 6.4 - Concentração e variação do Oxigênio Dissolvido



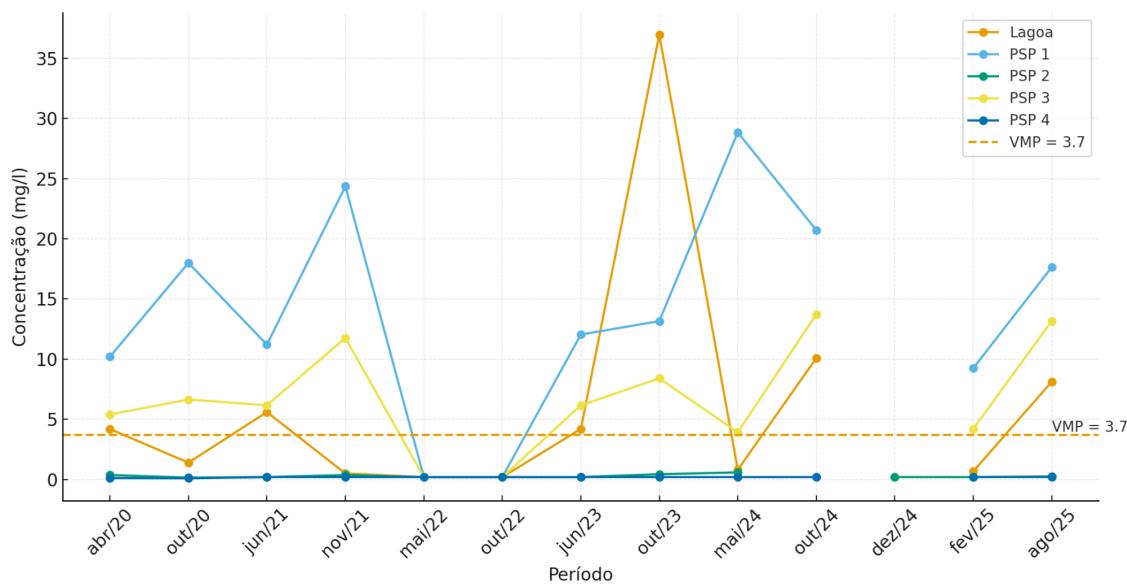
Fonte: Autora, 2025

A variação de OD acompanha diretamente os picos de DBO, indicando que, sempre que há aumento de matéria orgânica biodegradável, o consumo microbiológico de oxigênio se intensifica, provocando reduções expressivas no OD. Esse comportamento destaca que valores elevados de DBO tendem a reduzir o oxigênio dissolvido a níveis críticos, podendo gerar condições de estresse e até anoxia em corpos d'água Von Sperling (2014). Em diversos momentos do monitoramento, as reduções de OD coincidem com elevações pontuais de DBO em vários PSPs, especialmente nos períodos de maior precipitação, quando ocorre o carregamento de matéria orgânica fresca para o curso d'água.

6.1.5 Nitrogênio Ammoniacal

O parâmetro apresenta elevada variabilidade ao longo da série histórica, com concentrações que, em diversos períodos, ultrapassam o limite estabelecido, destacando para a Lagoa, PSP1 e PSP 3, enquanto os PSPs 2 e 4 mantêm valores relativamente mais baixos ao longo do período analisado. O nitrogênio amoniacal, cujos limites variam conforme o pH, frequentemente excede os valores estabelecidos pela CONAMA.

Figura 6.5 - Concentração de Nitrogênio Amoniacal em PSPs e Lagoa



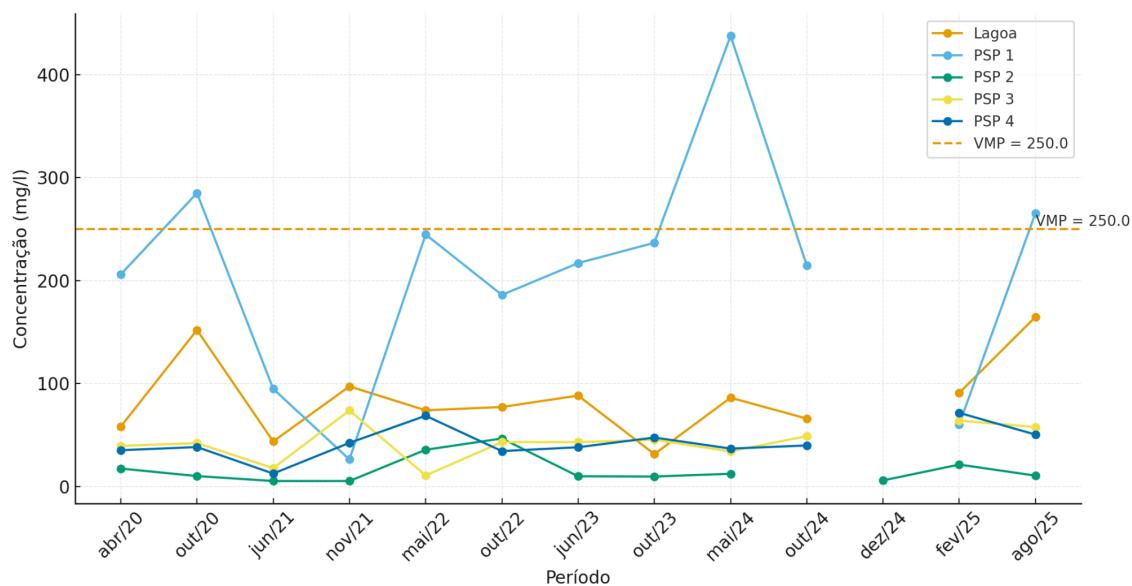
Fonte: Autora, 2025.

A amônia é um dos principais indicadores da presença de lixiviado recém-formado, já que o lixiviado em fases iniciais apresenta elevadas concentrações de amônia devido à decomposição protéica e à limitação da nitrificação (TCHOBANOGLOUS & KREITH, 2002).

6.1.6 Cloreto

O parâmetro apresenta comportamento padrão ao longo da série histórica, com maiores variações avaliadas no PSP1, sendo o único avaliado que ultrapassou os limites nos meses de outubro/2020, maio/2024 e agosto/2025. Pode-se observar que não houve padrão sazonal para este parâmetro. Desta forma, as oscilações pontuais nas concentrações de cloreto podem indicar alterações temporais na vazão do corpo d'água, sem necessariamente indicar um processo contínuo de aumento da carga contaminante.

Figura 6.6 - Concentração de Cloreto em PSPs e Lagoa



Fonte: Autora, 2025.

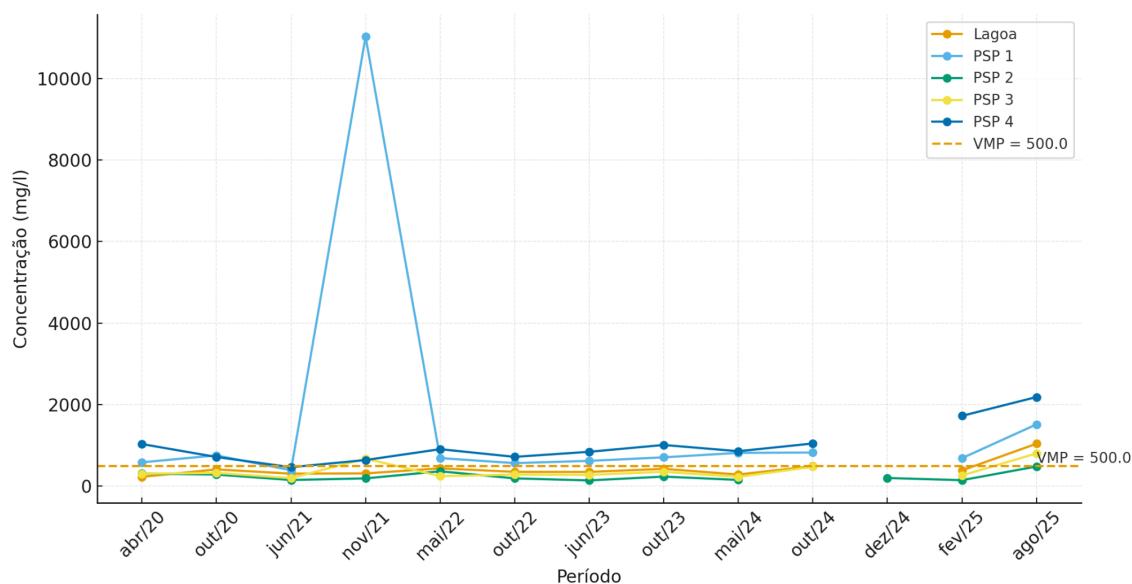
O cloreto não sofre remoção significativa por processos biológicos ou físico-químicos naturais, sendo útil para identificar a contribuição de água percolada em corpos superficiais (CETESB, 2016).

6.1.7 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

A análise da Figura 4.7 indica que a lagoa, o PSP 3 e o PSP 2 mantiveram-se, de modo geral, em maior conformidade com o Valor Máximo Permitido (VMP = 500 mg/L) para Sólidos Dissolvidos Totais, apresentando apenas pequenas variações ao longo do período analisado. Em contrapartida, os PSPs 1 e 4 apresentaram concentrações predominantemente acima do VMP, evidenciando um comportamento distinto dos demais pontos.

Destaca-se, em especial, o mês de novembro de 2021, no qual o PSP 1 registrou um valor atípico extremamente elevado, superior a 10.000 mg/L, configurando um evento isolado que influenciou significativamente a escala do gráfico. Apesar desse pico pontual, de forma geral, ao longo de todo o período e dos diferentes anos analisados, os valores de SDT nos PSPs e na lagoa apresentaram comportamento contínuo e relativamente padronizado, mantendo-se próximos ao VMP, sem indicar uma tendência progressiva de aumento ao longo do tempo.

Figura 6.7 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PSPs e Lagoa

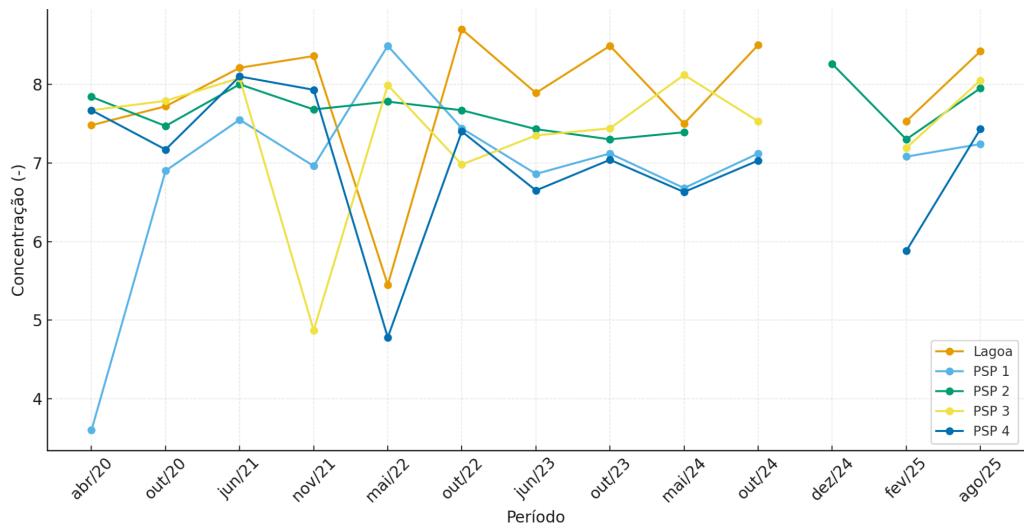


Fonte: Autora, 2025.

6.1.8 pH

O gráfico de pH evidencia que, ao longo de todo o período monitorado, os valores registrados mantiveram-se predominantemente dentro da faixa considerada neutra, variando entre 6,5 e 9,0, intervalo compatível com os padrões estabelecidos para águas doces pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Observa-se que as oscilações ao longo do tempo foram moderadas, com pequenas exceções para o PSP1 em abril/2020, PSP 3 em novembro de 2021 e PSP4 e lagoa em maio de 2022. Válido ressaltar que em dezembro de 2024, não houve análises do parâmetro.

Figura 6.8 - pH em PSPs e Lagoa



Fonte: Autora, 2025.

Considerando que os valores de pH permaneceram, de modo geral, na faixa neutra ao longo do período analisado, infere-se que a fração predominante do nitrogênio amoniacal tende a ocorrer na forma ionizada, menos tóxica, mesmo nos períodos em que foram observadas concentrações elevadas desse parâmetro.

6.2 Análise da Qualidade das Águas Superficiais nos Pontos Extras - PE

A avaliação dos parâmetros físico-químicos nos Pontos Extras (PEs) evidencia padrões distintos de qualidade da água ao longo do período monitorado, permitindo identificar áreas de maior e menor influência do aterro. Entre os parâmetros avaliados, a condutividade elétrica, os sólidos dissolvidos totais (SDT), os cloretos e os nitratos se destacam como indicadores fundamentais para avaliação de aporte iônico, presença de substâncias dissolvidas e influência da percolação.

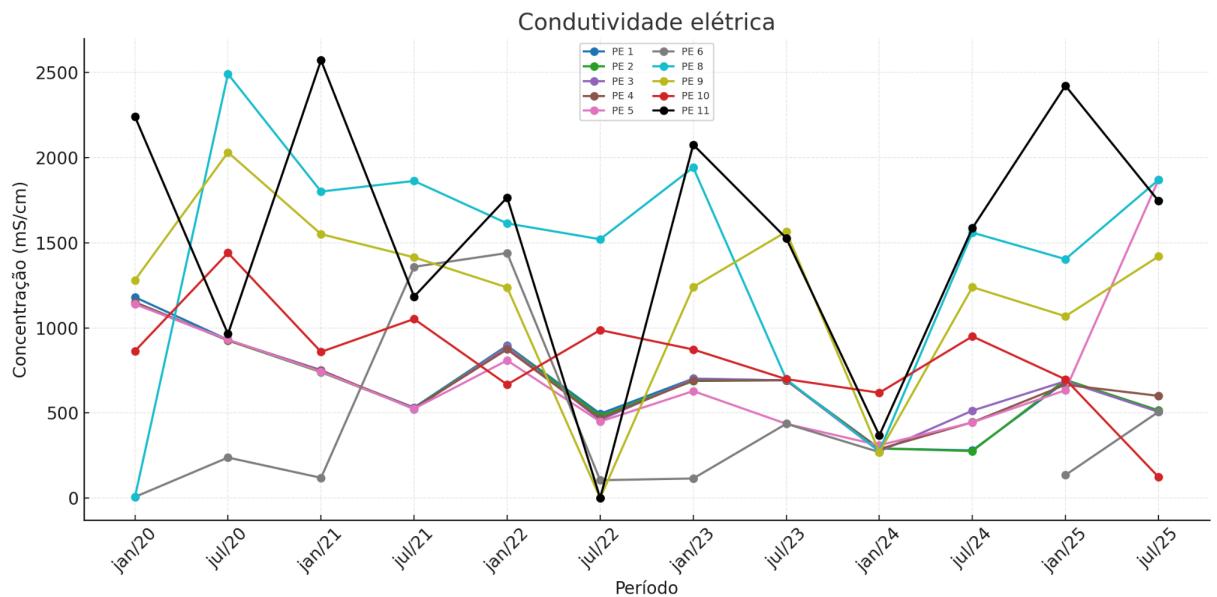
6.2.1 Condutividade Elétrica

Segundo Von Sperling (2014), a condutividade elétrica representa uma medida indireta da concentração de sais dissolvidos na água, sendo um dos parâmetros mais sensíveis à presença de lixiviados ou águas de contato com resíduos.

A Figura 6.9 apresenta a variação temporal da condutividade elétrica nos pontos de monitoramento extras para água superficial (PEs) ao longo do período analisado.

Observa-se que o parâmetro apresenta ampla variabilidade espacial e temporal, com valores que oscilam significativamente entre os diferentes pontos e períodos de amostragem.

Figura 6.9 - Concentração de Condutividade Elétrica em PEs



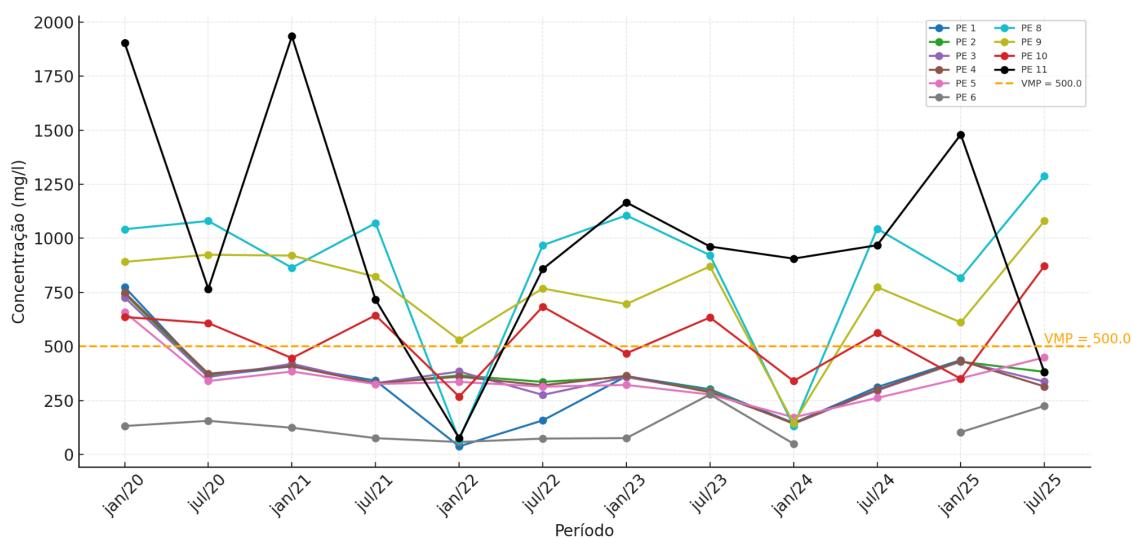
Fonte: Autora, 2025.

De modo geral, a condutividade elétrica manteve-se em patamares elevados em diversos pontos, indicando a presença contínua de sais dissolvidos na água subterrânea, compatível com a influência de íons conservativos, como cloreto, sódio e outros constituintes inorgânicos.

6.2.2 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Os pontos extras apresentam comportamento heterogêneo, com oscilações ao longo do período analisado e diferenças expressivas entre os pontos, refletindo distintas condições locais de composição iônica da água. De modo geral, verifica-se que diversos registros ultrapassam o VMP, indicando alterações relevantes na qualidade da água quanto à presença de sais dissolvidos.

Figura 6.10 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PEs

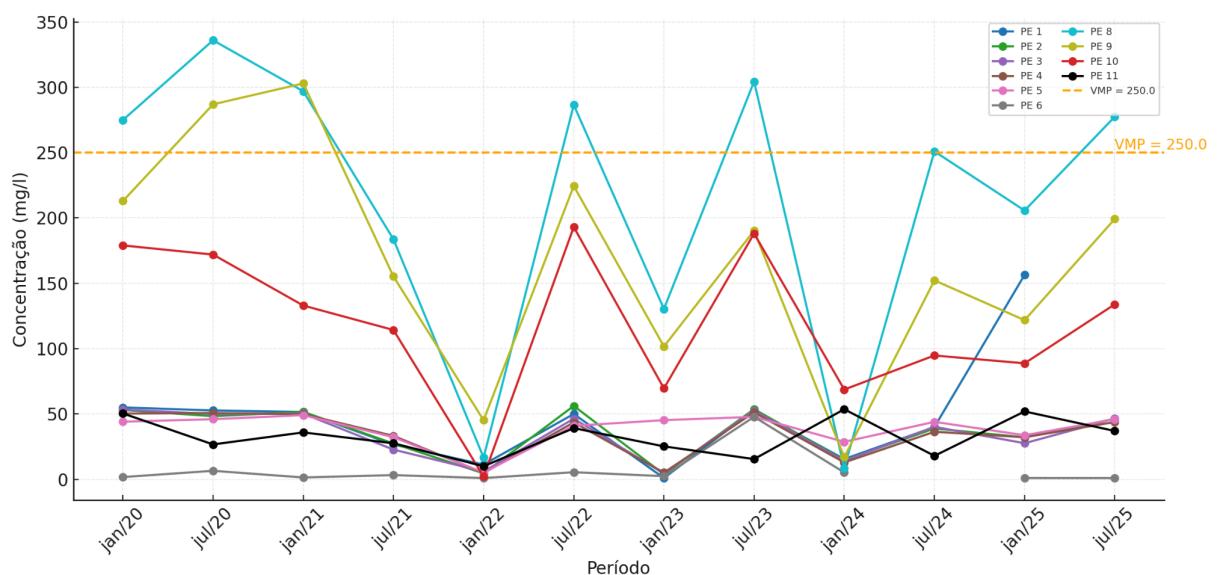


Fonte: Autora, 2025.

6.2.3 Cloretos

A Figura 6.11 apresenta a variação temporal das concentrações de cloretos nos pontos extras de monitoramento de água superficial (PEs), tendo como referência o Valor Máximo Permitido (VMP = 250 mg/L). Observa-se que o parâmetro apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, com diferenças marcantes entre os pontos monitorados ao longo do período analisado. De modo geral, a maioria dos PEs manteve concentrações inferiores ao VMP, indicando conformidade com o padrão de qualidade adotado para águas subterrâneas.

Figura 6.11 - Concentração de Cloreto em PEs



Fonte: Autora, 2025.

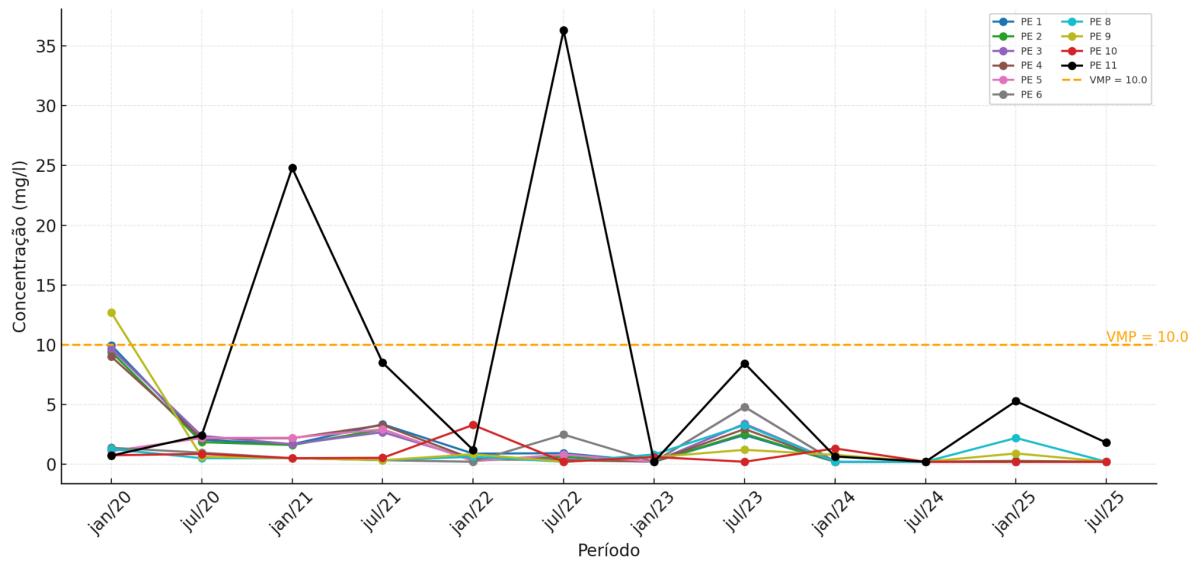
A análise dos dados demonstra que PE 8 e PE 9 ultrapassam o limite máximo em alguns períodos, atingindo concentrações acima de 300 mg/L.

6.2.4 Nitratos

A Figura 6.12 apresenta a variação temporal das concentrações de nitrato nos pontos de monitoramento de água subterrânea (PEs), tendo como referência o Valor Máximo Permitido (VMP = 10,0 mg/L). Na maior parte dos pontos e períodos analisados, as concentrações de nitrato permaneceram inferiores ao limite normativo, indicando, de modo geral, conformidade com o padrão de qualidade adotado para águas subterrâneas.

Entretanto, o PE 11 apresenta picos expressivos que chegam a ultrapassar 30 mg/L, sendo um indicativo de processos avançados de nitrificação associados à maturação da matéria orgânica e ao envelhecimento do lixiviado (METCALF & EDDY, 2014).

Figura 6.12 - Concentração de Nitratos em PEs



Fonte: Autora, 2025.

De maneira integrada, os padrões observados permitem identificar três grupos distintos de comportamento entre os PEs.

A avaliação da condutividade elétrica e dos sólidos dissolvidos totais (SDT) revela que os PEs instalados em área impermeabilizada (PE 8, PE 9 e PE 10) apresentam valores elevados e, em determinados períodos, superiores aos valores observados em pontos situados fora dessa área. Isso se deve, principalmente, à dinâmica das águas de contato acumuladas sobre a superfície impermeabilizada, que concentram sais durante o período seco e são parcialmente remobilizadas durante chuvas intensas. De acordo com Von Sperling (2014), águas submetidas à evaporação em superfícies impermeáveis tendem a apresentar maiores concentrações iônicas pela ausência de infiltração e pela acumulação superficial de partículas dissolvidas.

Dessa forma, os valores de condutividade e SDT nesses pontos não indicam necessariamente infiltração profunda ou falha na impermeabilização, podendo sim se tratar de um acúmulo superficial de substâncias solúveis, posteriormente drenadas para os pontos de coleta.

6.3 Análise da Qualidade das Águas Subterrânea

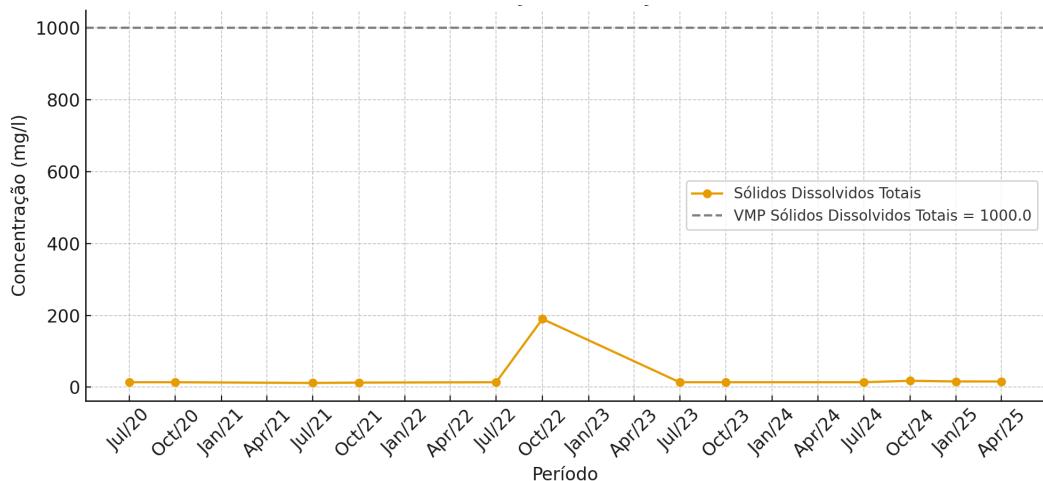
6.3.1 Análises PMI

A avaliação temporal dos parâmetros do ponto PM1, localizado fora da zona imediata de deposição de resíduos do aterro, permite identificar o comportamento hidrogeoquímico da água subterrânea frente aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 396/2008, que define o enquadramento e os valores orientadores para águas subterrâneas. Os gráficos analisados entre julho de 2020 e julho de 2025 reforçam um padrão de baixa contaminação físico-química, mas com vulnerabilidades microbiológicas importantes.

6.3.1.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) mantiveram-se consistentemente baixos, (Figura 6.13) ao longo de toda a série, variando entre aproximadamente 12 e 190 mg/L, muito abaixo do limite de 1000 mg/L comumente adotado como referência para águas subterrâneas de baixa salinidade. A própria CONAMA estabelece que águas subterrâneas de melhor qualidade tendem a apresentar baixa mineralização, especialmente em aquíferos não impactados (CONAMA, 2008).

Figura 6.13 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PM1

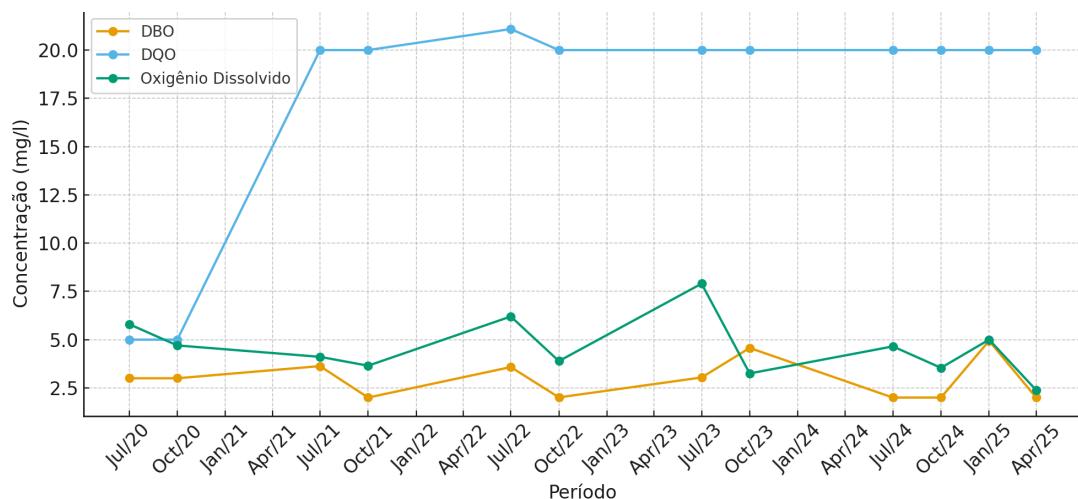


Fonte: Autora, 2025.

6.3.1.2 DBO, DQO e OD

A análise da DBO, DQO e OD demonstra que o ponto exibe características típicas de água subterrânea pouco impactada por matéria orgânica.

Figura 6.14 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM1



Fonte: Autora, 2025.

A DBO permaneceu majoritariamente na faixa de 2 a 5 mg/L, e a DQO raramente ultrapassou 20 mg/L, valores muito inferiores àqueles associados a efluentes domésticos e a lixiviado, que podem apresentar DBO acima de 200 mg/L e DQO acima de 400 mg/L, segundo Von Sperling, efluentes sanitários apresentam cargas orgânicas elevadas, caracterizadas por valores típicos de DBO entre 200 e 500 mg/L (VON SPERLING, 2014).

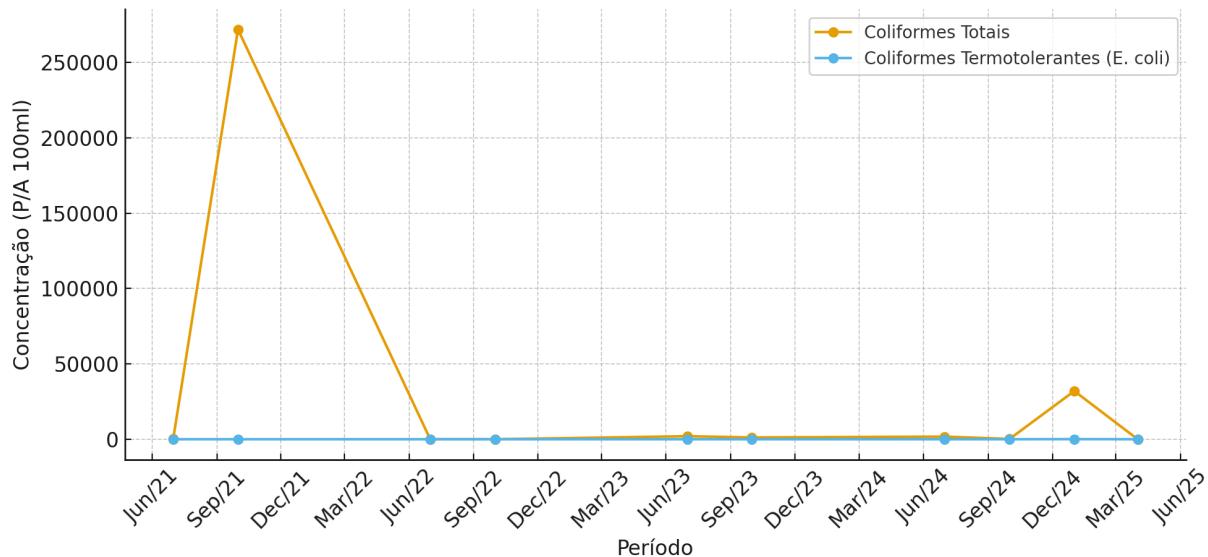
Essa discrepância entre o comportamento do PM1 e o padrão de possível contaminação orgânica reforça que o ponto analisado não está sob influência direta da pluma de lixiviados. O comportamento do Oxigênio Dissolvido também corrobora essa interpretação: apesar de oscilações pontuais, a maior parte dos valores se mantém entre 3 e 7 mg/L, indicando ausência de consumo acentuado de oxigênio por processos oxidativos oriundos de matéria orgânica em excesso.

6.3.1.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. coli*)

A Figura 4.15 apresenta a variação temporal das concentrações de coliformes totais e coliformes termotolerantes (*E. coli*) no ponto de monitoramento de água subterrânea PM1.

Observa-se que, ao longo de toda a série histórica analisada, ambos os parâmetros apresentaram presença contínua, ainda que em concentrações reduzidas na maior parte dos períodos. A representação gráfica, no entanto, é fortemente influenciada pela máxima da escala do eixo vertical, decorrente do setembro de 2021 para coliformes totais. Contudo, conforme planilha de dados fornecida pela SLU, todos os meses houveram presença de coliformes totais e termotolerantes.

Figura 6.15 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. coli*) em PM1



Fonte: Autora, 2025.

A presença de *E. coli* na água subterrânea é interpretada como indicador de contaminação fecal recente, conforme afirmado pela Portaria MS 888/2021 de potabilidade, que estabelece que a presença de *Escherichia coli* representa falha de proteção sanitária e risco direto à saúde humana (BRASIL, 2021). Segundo Von Sperling, coliformes termotolerantes constituem um indicador seguro de contaminação fecal, estando frequentemente associados a patógenos (VON SPERLING, 2014).

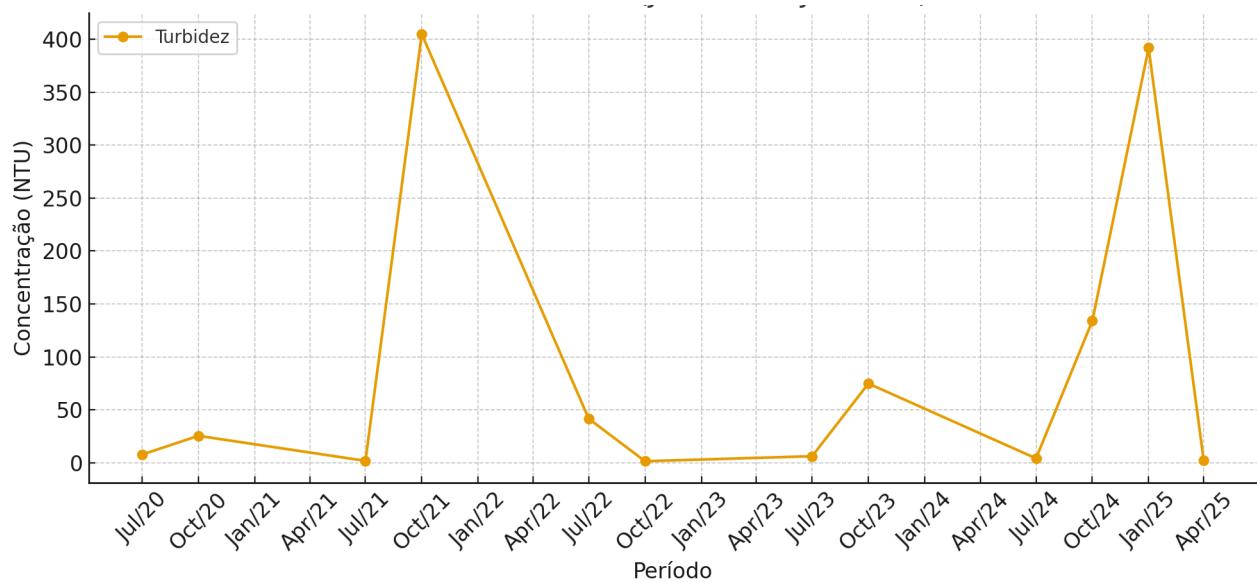
A CONAMA 396/2008 também reforça a importância de monitorar coliformes como

indicador microbiológico essencial para enquadramento.

6.3.1.4 Turbidez

A turbidez apresenta variabilidade com picos muito elevados em diferentes análises. Embora a Portaria 888/2021 trate de limites para água tratada, estabelece que altos valores de turbidez prejudicam processos de desinfecção e estão associados à presença de partículas e microrganismos (BRASIL, 2021). Essa característica reforça o padrão microbiológico encontrado e sugere episódios de entrada de partículas suspensas, provavelmente associadas a condições físicas do poço, método de construção inadequado ou influência de eventos de recarga superficial.

Figura 6.16 - Concentração de Turbidez em PM1



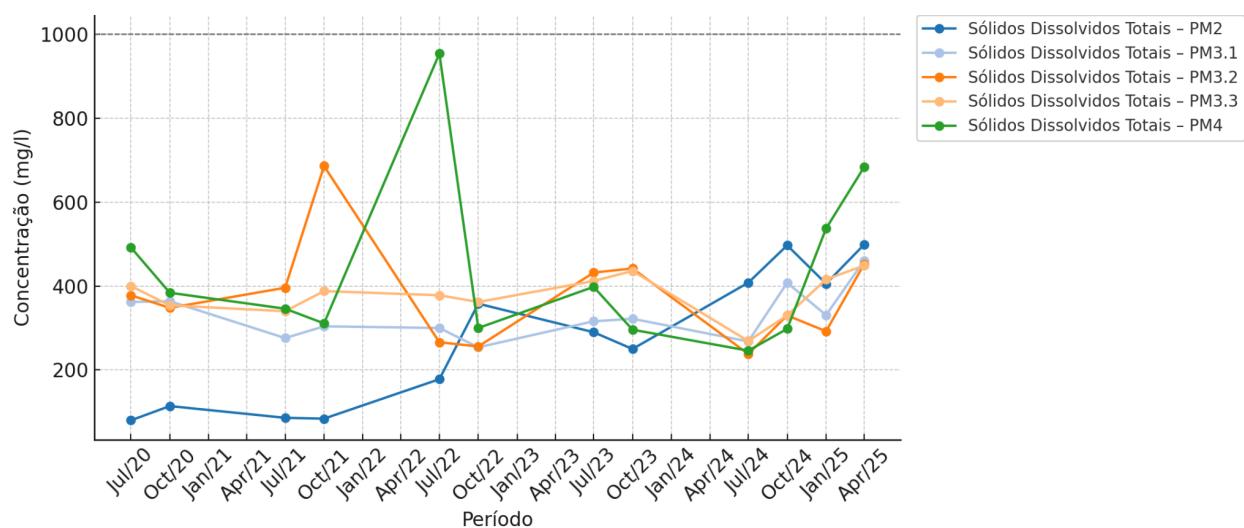
Fonte: Autora, 2025.

6.3.2 Análise dos poços PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4

6.3.2.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Os gráficos integrados mostram que, diferentemente do PM1, que exibia valores sistematicamente baixos e estáveis, os pontos próximos à lagoa apresentam variação maior de SDT, com episódios de elevação maiores.

Figura 6.17 - Concentração de SDT em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4



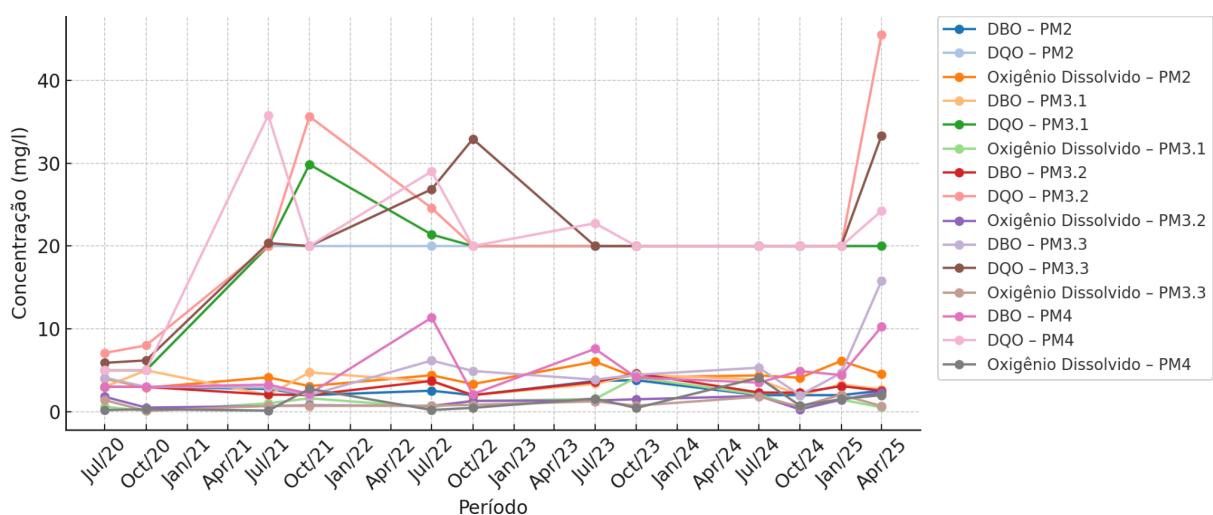
Fonte: Autora, 2025.

Embora a maioria dos valores permaneça abaixo dos 200–300 mg/L, alguns pontos registram picos mais acentuados em determinados anos, principalmente após 2022. Essa oscilação indica um aumento relativo da mineralização na água subterrânea.

6.3.2.2 DBO, DQO e OD

Os valores de DBO e DQO nos pontos a jusante exibem tendência de elevação maior do que a observada no PM1, sobretudo nas análises específicas em PM3.1, PM3.2, PM 3.3 e PM4. Apesar de não alcançarem valores elevados típicos de lixiviado, os aumentos podem representar contato com águas que sofreram mistura com matéria orgânica degradada. Segundo Von Sperling 2014, águas subterrâneas impactadas por matéria orgânica apresentam elevação da DQO e redução do oxigênio dissolvido devido ao consumo químico e biológico de oxigênio.

Figura 6.18 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4



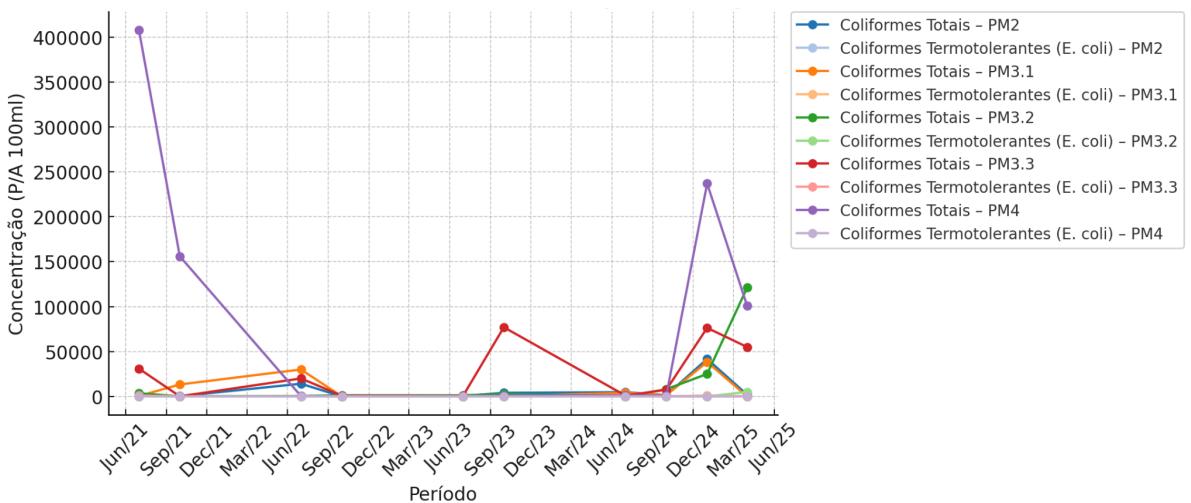
Fonte: Autora, 2025.

A própria Resolução CONAMA nº 396/2008, que estabelece diretrizes para a classificação e proteção das águas subterrâneas, reconhece que essas águas possuem condições físico-químicas distintas das águas superficiais, não sendo estabelecido valor mínimo obrigatório de oxigênio dissolvido para aquíferos. Essa ausência de VMP para OD em águas subterrâneas decorre do entendimento técnico de que baixos teores de oxigênio dissolvido são naturais nesse meio e não caracterizam, por si só, degradação da qualidade da água (BRASIL,2008).

6.3.2.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*)

No gráfico, observa-se que os pontos PM2–PM4 apresentam picos de concentração de coliformes mais elevados e mais frequentes do que PM1. Picos importantes surgem em PM3.1, PM3.2, PM3.3 e PM4, atingindo níveis incompatíveis com qualquer classe de uso mais restritiva. Coliformes termotolerantes são indicadores microbiológicos essenciais e que sua presença denota alteração antrópica significativa (BRASIL, 2008).

Figura 6.18 - Concentração de Coliforme Totais e Termotolerantes (*E. Coli*) em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4



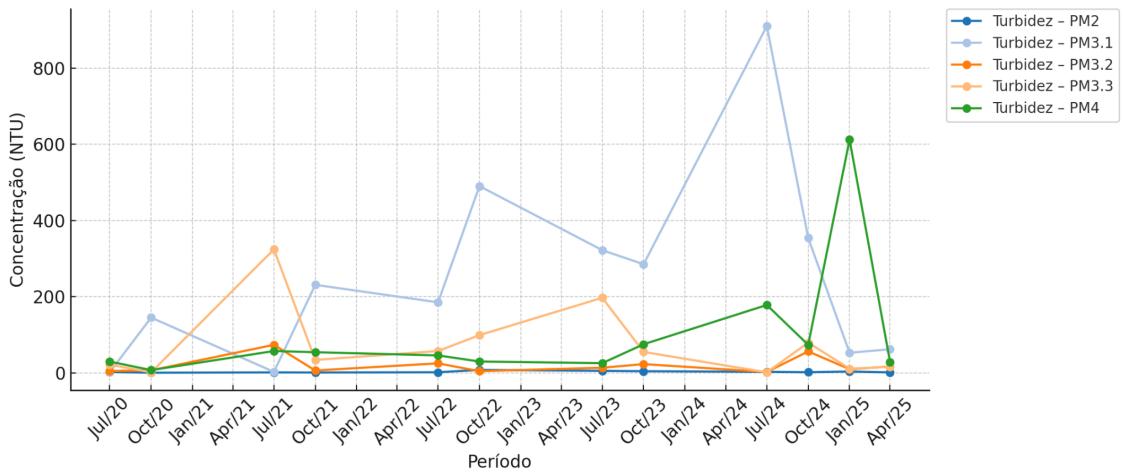
Fonte: Autora, 2025.

Os coliformes termotolerantes representam uma medida direta de contaminação fecal e estão frequentemente associados ao risco sanitário imediato (VON SPERLING, 2014).

6.3.2.4 Turbidez

Observa-se que, na maior parte da série histórica, os valores de turbidez mantiveram-se relativamente baixos, com oscilações pontuais entre os períodos monitorados, o que indica, de modo geral, estabilidade física da água subterrânea quanto à presença de partículas em suspensão.

Figura 6.19 - Concentração de Turbidez em PM2, PM3.1, PM 3.2, PM 3.3 e PM4



Fonte: Autora, 2025.

Entretanto, destacam-se eventos pontuais de elevação expressiva da turbidez em determinados pontos e períodos, com maior destaque para o PM3.1, PM3.3 e PM4, enquanto os demais pontos mantiveram valores mais baixos e com menor variabilidade.

6.3.3 Análise dos poços PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11

Os pontos PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11 se localizam em áreas de maior sensibilidade hidrogeológica dentro do aterro, pois se encontram próximos a áreas de disposição de resíduos: PM5 e PM6 junto à área de resíduos de serviços de saúde (AC-02, encerrada em 2007) e os demais pontos nas proximidades da Célula Emergencial, encerrada em 2006. Esse contexto espacial é fundamental para interpretar o comportamento dos parâmetros, uma vez que células mais recentes tendem a produzir lixiviados “jovens”, mais reativos, enquanto células antigas apresentam lixiviado mais estabilizado e sujeito a processos de atenuação natural ao longo do tempo (KJELDSEN et al., 2002).

6.3.3.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

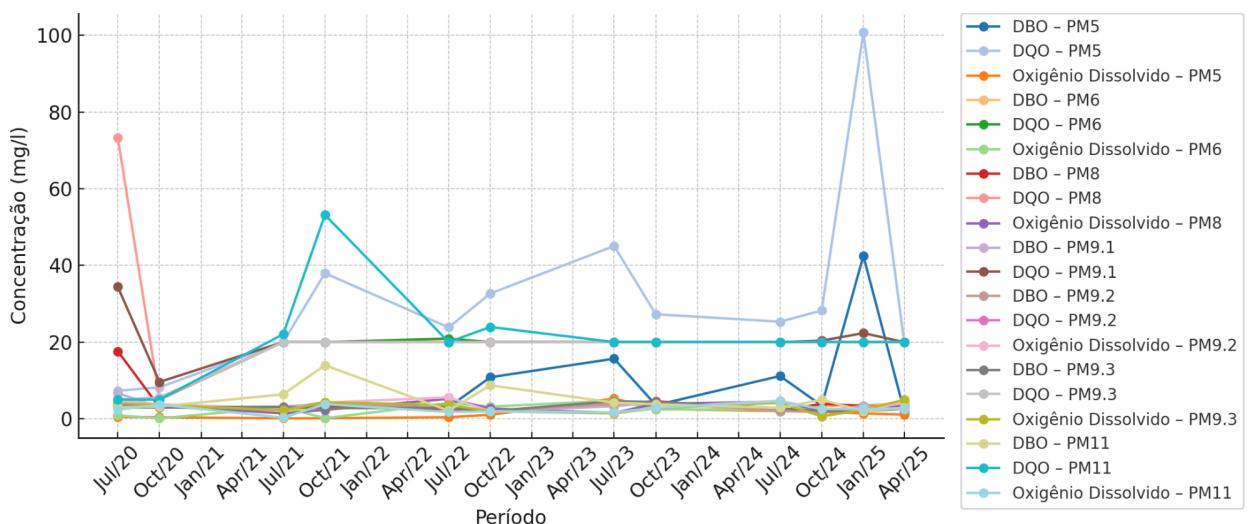
De acordo com os dados consolidados na planilha apresentada no Apêndice II. Observa-se que os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) apresentam concentrações mais elevadas nos pontos PM5 e PM6, quando comparados aos demais poços de monitoramento. No PM5, os valores variam aproximadamente entre 220 e 738 mg/L, enquanto no PM6 as concentrações situam-se entre 176 e 415 mg/L, caracterizando uma água subterrânea com maior grau de mineralização na área adjacente à célula de resíduos hospitalares AC-02. Esse comportamento indica diferenças hidrogeoquímicas locais associadas à área de influência desse setor do aterro.

Nos pontos vinculados à Célula Emergencial (PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11), os valores de SDT apresentam faixas mais moderadas, em geral entre 50 e 600 mg/L, embora sejam observados picos pontuais, especialmente nos poços PM8 e PM9.1. Ainda assim, ressalta-se que todos os valores registrados permanecem abaixo do limite de 1.000 mg/L, frequentemente adotado como referência para salinidade aceitável em águas subterrâneas de melhor qualidade, indicando conformidade com esse critério ao longo do período analisado.

6.3.3.2 DBO, DQO e OD

Os valores de DBO e DQO evidenciam um aumento marcante de carga orgânica principalmente no PM5. A DBO atinge cerca de 42,5 mg/L, e a DQO chega a aproximadamente 100,8 mg/L, enquanto o Oxigênio Dissolvido atinge valores mínimos próximos de 0,1 mg/L. Esses números são compatíveis com ambientes impactados por matéria orgânica em decomposição (ex.: lixiviado), visto que, efluentes com elevada carga orgânica promovem consumo intenso de oxigênio e redução significativa de OD, acompanhada de aumento da DQO (VON SPERLING, 2014).

Figura 6.20 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11



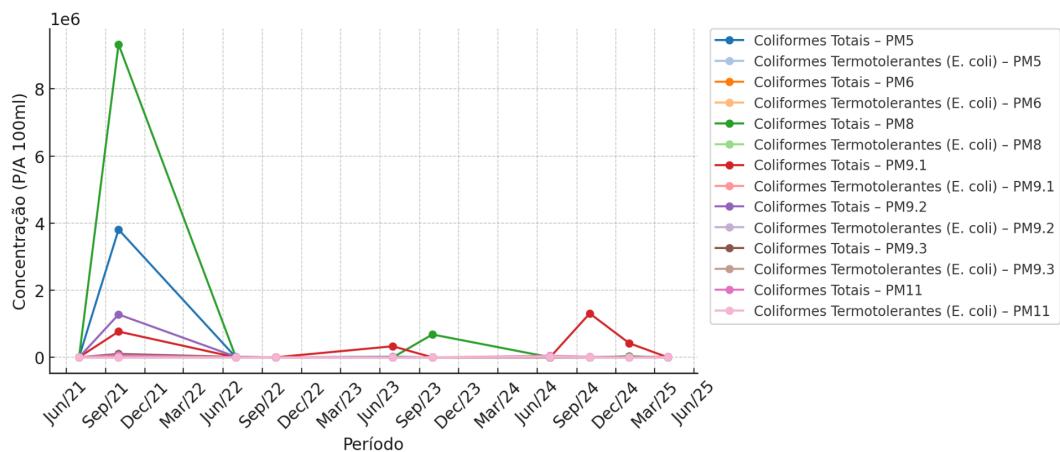
Fonte: Autora, 2025.

Nos demais pontos (PM6, PM8, PM9.1-3, PM11), os valores de DBO e DQO, embora menores que em PM5 e o OD também apresenta episódios de queda para faixas abaixo de 1 mg/L em alguns momentos da série. Isso indica que há zonas localmente redutoras e com matéria orgânica em quantidade suficiente para consumir o oxigênio dissolvido.

6.3.3.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*)

Do ponto de vista microbiológico, os resultados desses pontos são marcadamente críticos. Em PM5, os Coliformes Totais variam de cerca de 510 a 3.810.000 NMP/100 mL, e os Coliformes Termotolerantes (*E. Coli*) alcançam até 181 NMP/100 mL. Em PM11, a situação também é muito grave, com *E. coli* chegando a aproximadamente 26.100 NMP/100 mL, valores completamente incompatíveis com qualquer uso mais restritivo.

Figura 6.21 - Concentração de Coliformes Totais e Coliformes Termotolerantes (*E. Coli*) em PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11



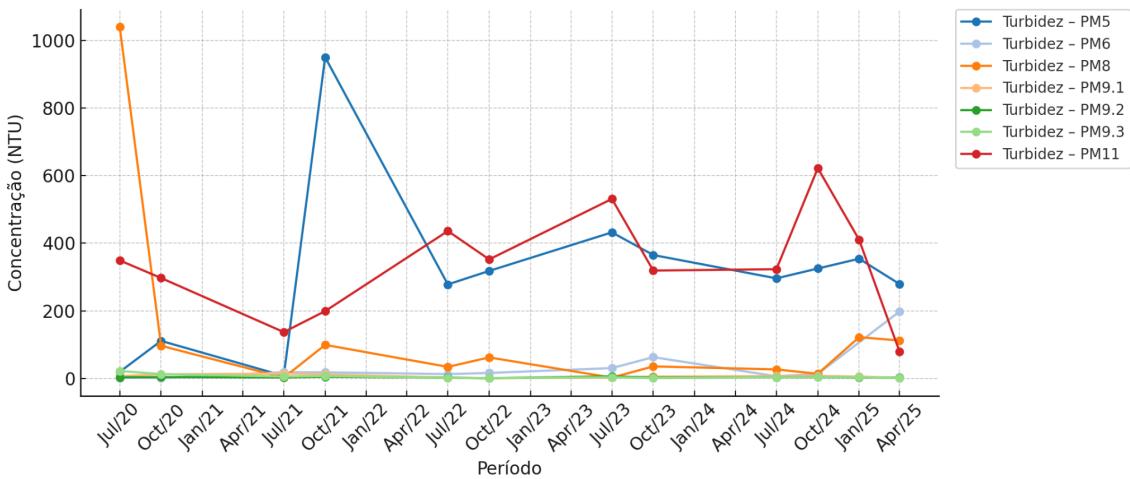
Fonte: Autora, 2025.

A Resolução CONAMA 396/2008 indica os Coliformes Termotolerantes como parâmetro-chave para avaliação de impacto antrópico na água subterrânea (CONAMA, 2008), e a Portaria GM/MS 888/2021 estabelece que, para consumo humano, deve haver ausência de *E. Coli* em 100 mL (BRASIL, 2021).

6.3.3.4 Turbidez

A turbidez nesses poços reforça a leitura de um ambiente altamente vulnerável. Em PM5, os valores variam de cerca de 7 a 950 NTU, enquanto em PM11 a faixa vai de aproximadamente 79 a 622 NTU. Mesmo nos pontos vinculados à célula emergencial (PM8, PM9.1-3), há episódios de turbidez elevada, frequentemente associada a condições de recarga intensa, arraste de finos, instabilidade do aquífero.

Figura 6.22 - Concentração de Turbidez em PM5, PM6, PM8, PM9.1, PM9.2, PM9.3 e PM11



Fonte: Autora, 2025.

6.3.4 Análise dos Poços da Célula Principal

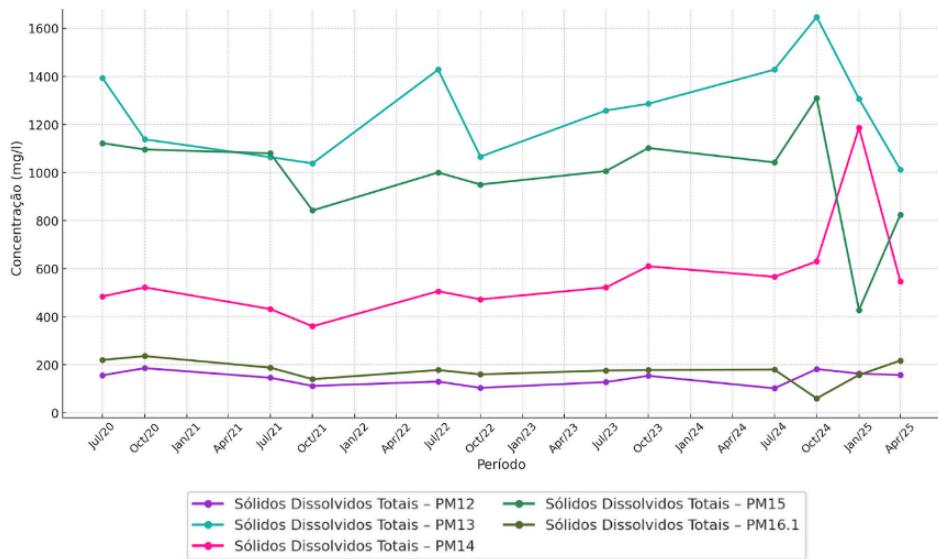
Neste item são avaliados os parâmetros da célula principal do aterro, classificada em Ampliação, AC-03, AC-04 e AC-05. Para melhor análise, os pontos de monitoramento foram separados por grupos, sendo: Grupo 01: PM12, PM13, PM14, PM15 e PM16.1; Grupo 02: PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2 e PM17.3; Grupo 3: PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19 e PM20.1; Grupo 4: PM20.2, PM20.3, PM21 e PM23.

6.3.4.1 Sólidos Dissolvidos Totais - SDT

Os valores de SDT apresentam variações relevantes entre os quatro grupos de PMs, indicando diferenças marcantes no grau de mineralização da água subterrânea.

No Grupo 1 (PM12, PM13, PM14, PM15 e PM16.1), observa-se um conjunto de poços com SDT moderado a elevado, com PM12 e PM13 se destacando por concentrações que, em determinados períodos, ultrapassam significativamente os valores esperados para aquíferos naturais. Isso sugere que esses pontos estão alinhados a zonas de maior fluxo preferencial, recebendo a assinatura geoquímica mais marcada das células encerradas. O PM15 apresenta comportamento intermediário, enquanto o PM16.1 demonstra oscilações mais suaves, possivelmente indicando maior influência de diluição.

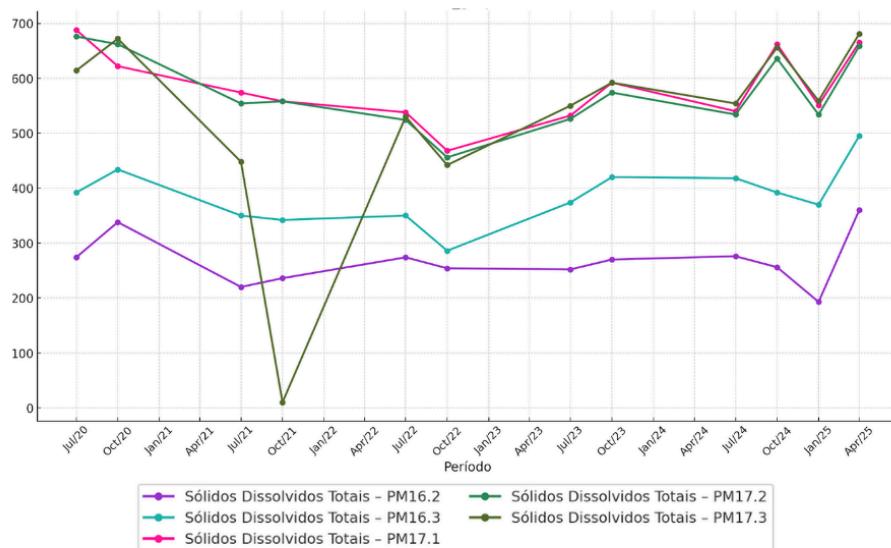
Figura 6.23 - Concentração de SDT em PM12, PM13, PM14, PM15 e PM16.1



Fonte: Autora, 2025

No Grupo 2 (PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2 e PM17.3), a tendência de SDT continua, mas com padrões um pouco menos acentuados. Os PMs 16.2 e 16.3 mantêm níveis mais estáveis, enquanto PM17.1 e PM17.3 exibem picos em campanhas pontuais, possivelmente associados a eventos de recarga superficial ou migração temporária de massa dissolvida. O PM17.2, por sua vez, exibe comportamento mais amortecido, com valores inferiores aos demais do grupo.

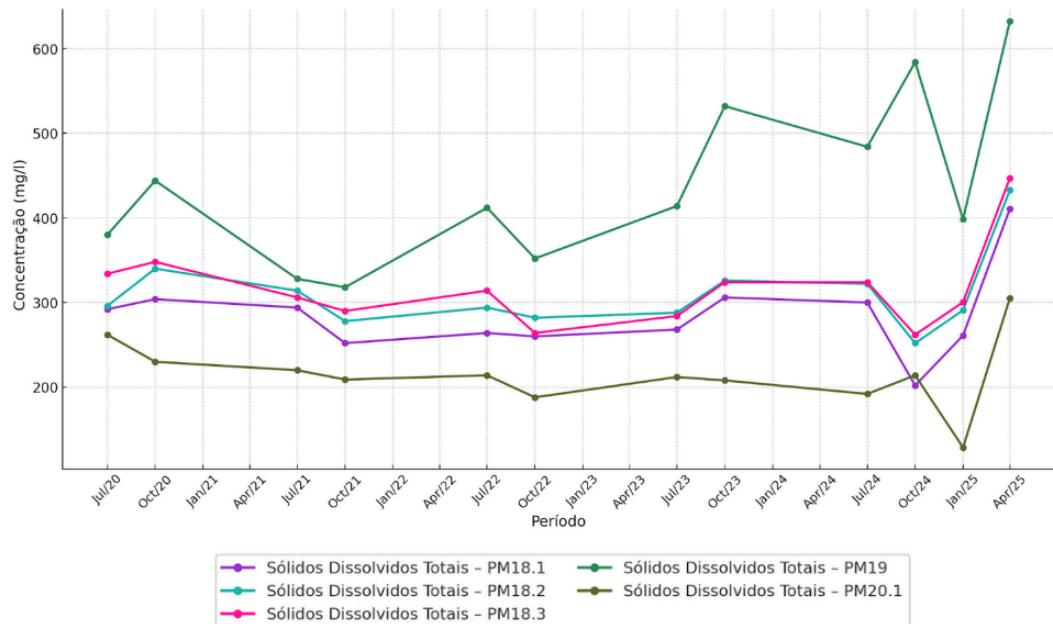
Figura 6.24 - Concentração de SDT em PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2 e PM17.3



Fonte: Autora, 2025

No Grupo 3 (PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19 e PM20.1), observa-se um dos comportamentos mais heterogêneos. O PM18.1 e PM18.3 apresentam elevados valores de SDT. O PM19, por sua vez, alterna entre valores moderados e altos, sugerindo influência intermitente de processos de transporte. O PM20.1 mostra SDT elevado e persistente, reforçando sua posição como ponto sensível ao impacto histórico das células.

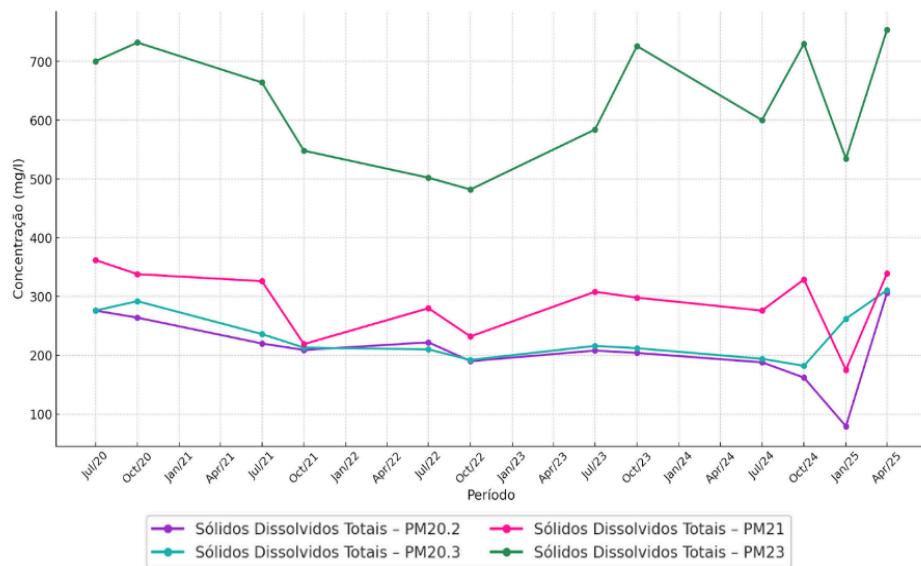
Figura 6.25 - Concentração de SDT em PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19 e PM20.1



Fonte: Autora, 2025

No Grupo 4 (PM20.2, PM20.3, PM21 e PM23), observa-se que PM23 e PM21 apresentam SDT elevado em várias análises, enquanto PM20.2 e 20.3 se comportam com maior estabilidade, mostrando poucos picos.

Figura 6.26 - Concentração de SDT em PM20.2, PM20.3, PM21 e PM23



Fonte: Autora, 2025.

6.3.4.2 DBO, DQO e OD

As análises separadas em quatro grupos sugerem um padrão típico de pluma orgânica antiga, com persistência de matéria orgânica biodegradável e refratária e ambiente de baixa oxigenação.

No Grupo 1 (PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1), os PM12 e PM13 se destacam com elevados valores de DBO e DQO, associados a quedas acentuadas do OD. Isso caracteriza um ambiente anóxico, típico de áreas próximas a aterro. PM14, PM15 e PM16.1 apresentam valores mais moderados, mas ainda com variações que reforçam a influência da matéria orgânica remanescente.

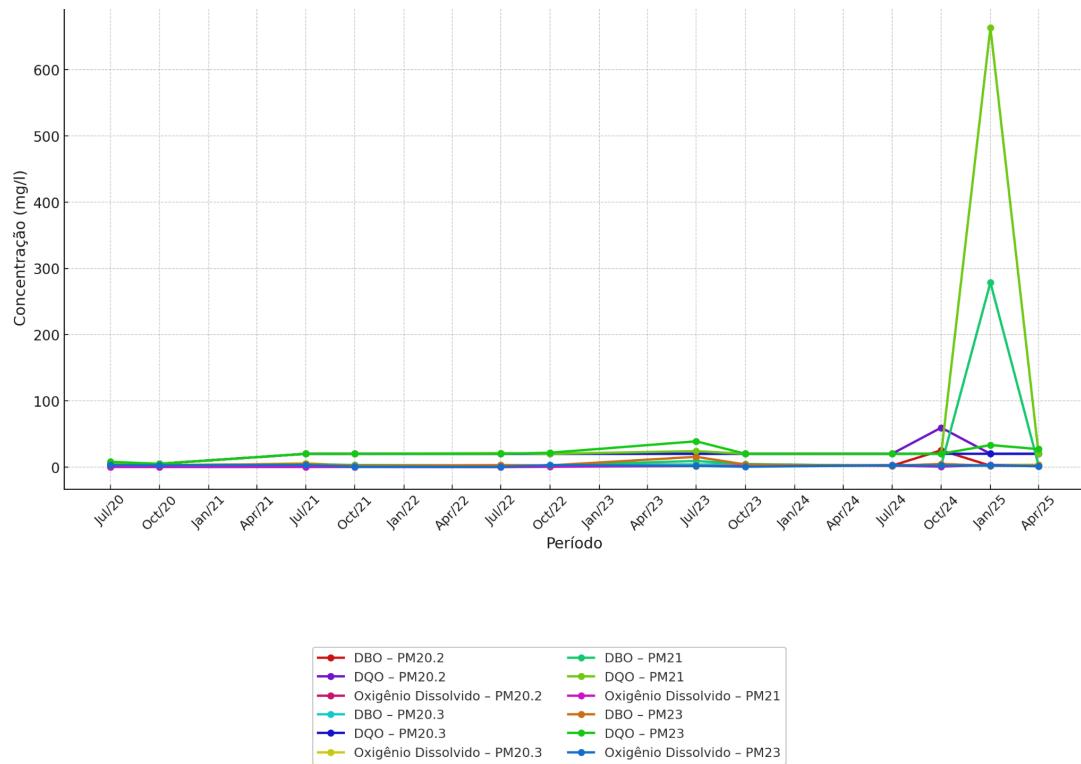
No Grupo 2 (PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3), observa-se comportamento mais diluído, embora PM17.1 e PM17.3 apresentem alguns episódios de aumento significativo de DQO. O OD permanece reduzido na maior parte das campanhas, refletindo consumo persistente de oxigênio no aquífero.

No Grupo 3 (PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19, PM20.1) há comportamento típico de áreas com contribuição importante de matéria orgânica antiga. PM18.1 e PM18.3 apresentam as maiores amplitudes do grupo. O PM20.1 mantém valores elevados de DQO, com DBO moderada, indicando, possivelmente, a presença de matéria orgânica

predominantemente refratária. O OD permanece baixo em vários períodos.

No Grupo 4 (PM20.2, PM20.3, PM21, PM23) os valores de DBO e DQO são mais variáveis, com PM21 exibindo picos marcantes e quedas intensas de OD. PM20.2 e PM20.3 apresentam comportamento intermediário, enquanto PM23 demonstra menor intensidade orgânica.

Figura 6.27 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM20.2, PM20.3, PM21, PM23

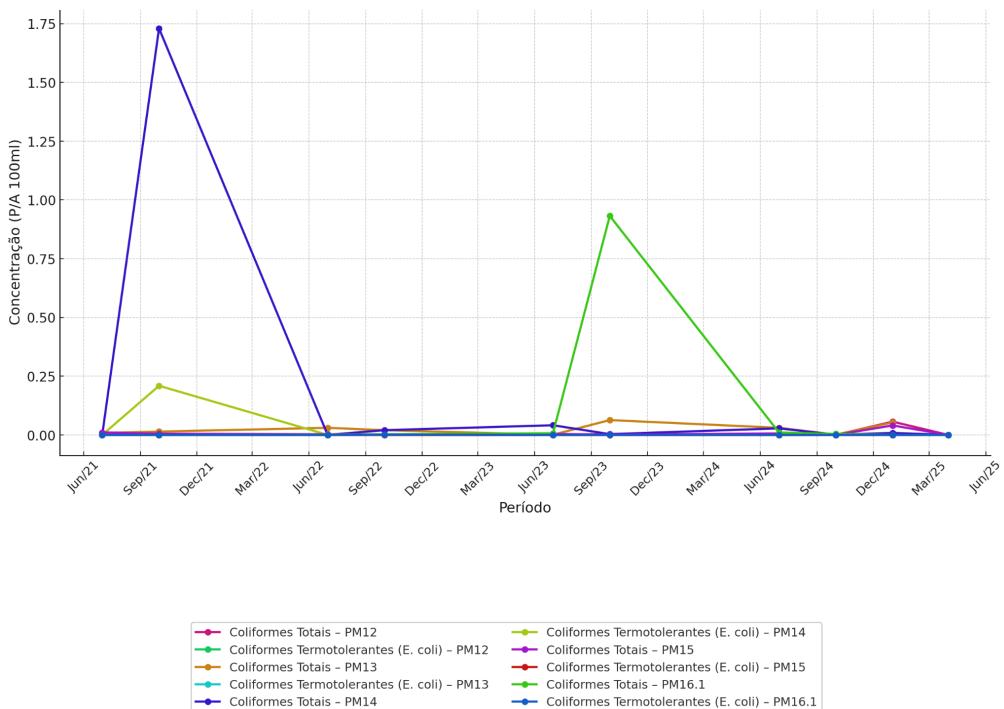


Fonte: Autora, 2025.

6.3.4.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. coli*)

No Grupo 1 (PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1), os PM12 e PM13 apresentam alguns valores elevados de coliformes totais e *E. coli*. Os demais PMs (PM14, PM15, PM16.1) também mostram valores altos, mas com variações mais espaçadas.

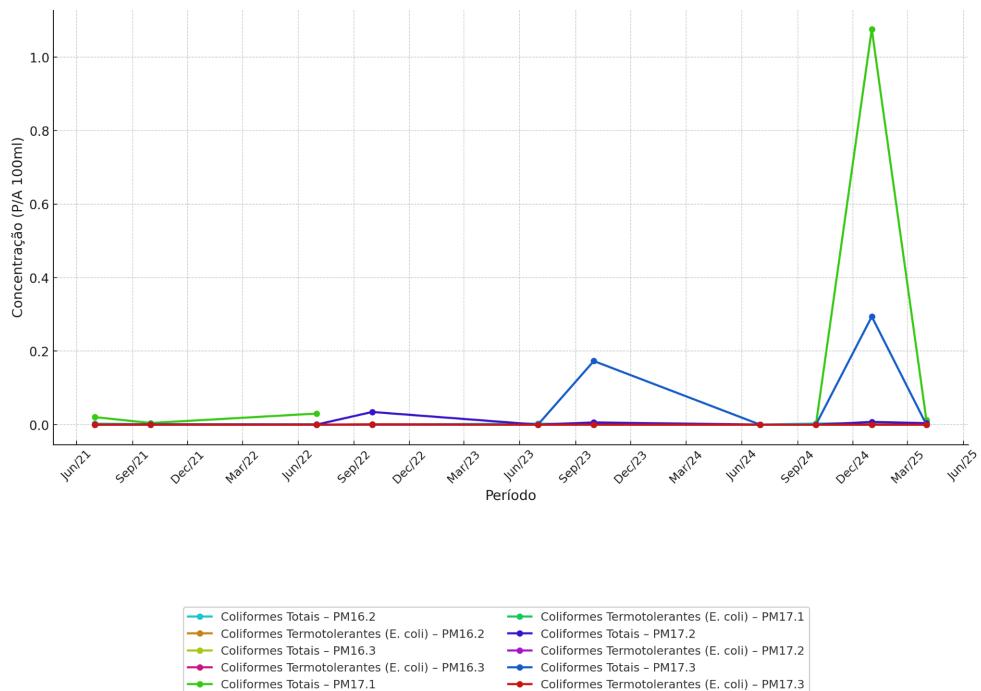
Figura 6.28 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. coli*) em PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1



Fonte: Autora, 2025.

No Grupo 2 (PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3), os valores continuam elevados, mas alguns PMs como PM16.2 e PM17.2 apresentam oscilações mais amortecidas. O PM17.1 e PM17.3, porém, registram valores críticos em campanhas específicas, reforçando a entrada direta de águas superficiais.

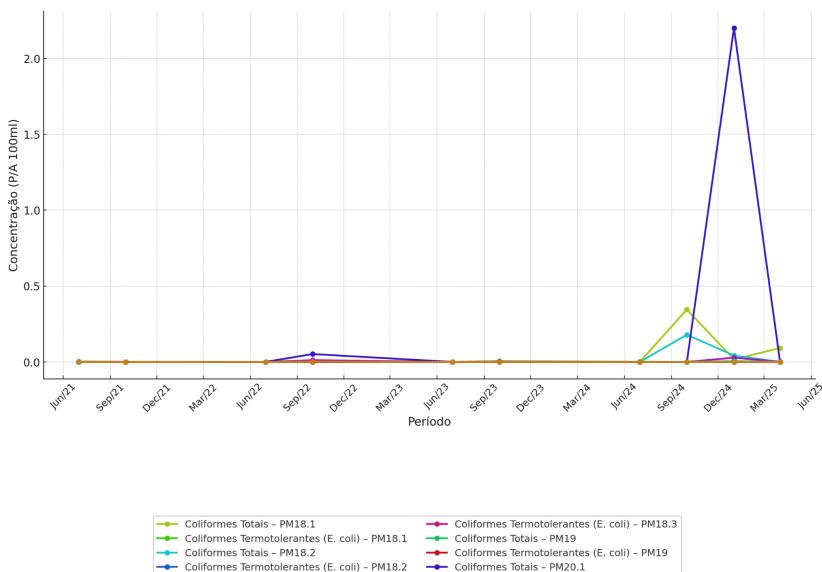
Figura 6.29 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. coli*) em PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3



Fonte: Autora, 2025.

No Grupo 3 (PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19, PM20.1), a contaminação é muito pronunciada. PM18.1 e PM18.3 registram alguns dos maiores valores de todo o conjunto. O PM20.1 também apresenta concentrações elevadas e persistentes, indicando baixa proteção sanitária.

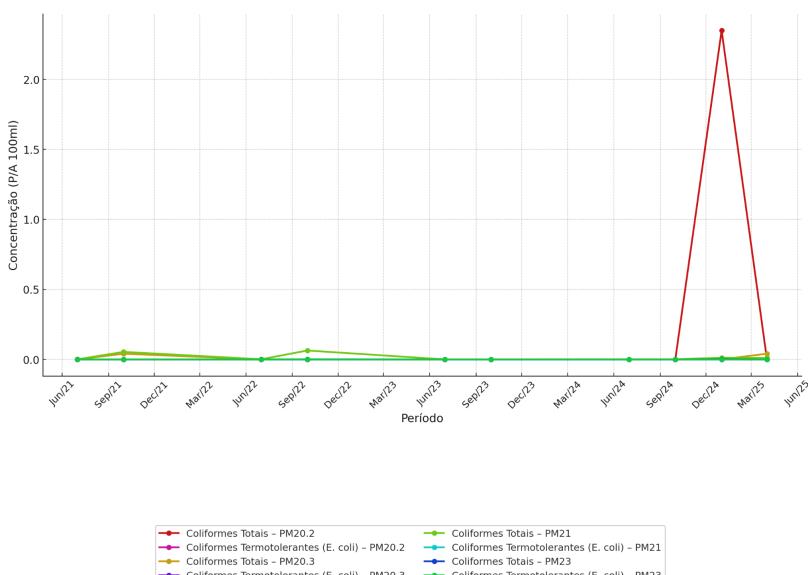
Figura 6.30 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19, PM20.1



Fonte: Autora, 2025.

No Grupo 4 (PM20.2, PM20.3, PM21, PM23), PM21 se destaca com valores extremamente elevados. Os PM20.2 e PM20.3 apresentam padrões críticos semelhantes. O PM23, embora com valores menores, ainda apresenta presença significativa de coliformes.

Figura 6.31 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (E. Coli) em PM20.2, PM20.3, PM21, PM23, PM21



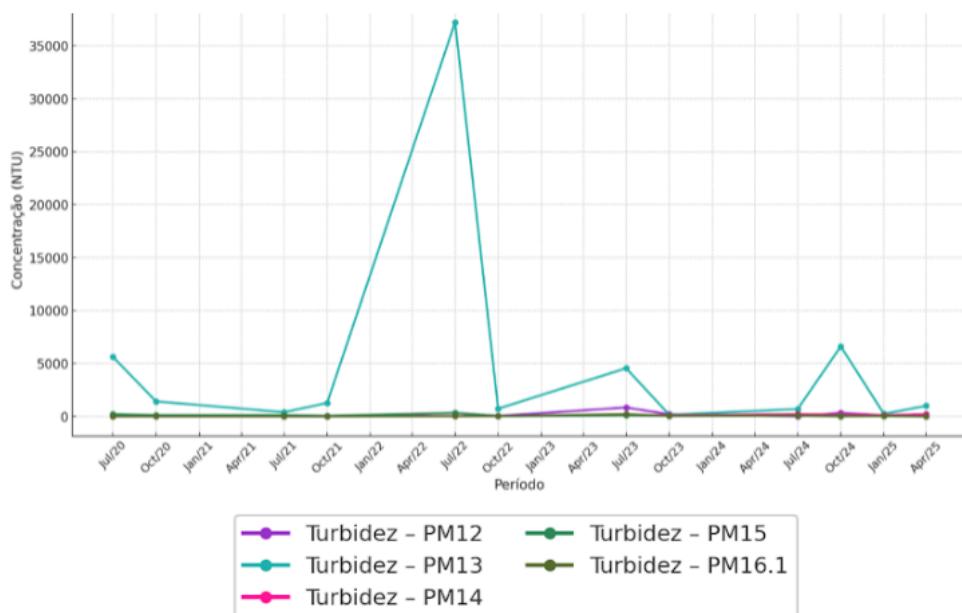
Fonte: Autora, 2025.

6.3.4.4 Turbidez

A turbidez apresenta comportamento fortemente irregular entre os grupos, revelando uma área hidrogeologicamente vulnerável.

No Grupo 1 (PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1), os PM12 e PM13 se destacam com turbidez muito elevada, alcançando picos excepcionais. Isso indica forte conexão com águas superficiais e mobilização de partículas finas. O PM14 demonstra picos intermediários, enquanto PM15 e PM16.1 apresentam variações significativas, mas em níveis menos extremos.

Figura 6.32 - Concentração de Turbidez em PM12, PM13, PM14, PM15, PM16.1



Fonte: Autora, 2025.

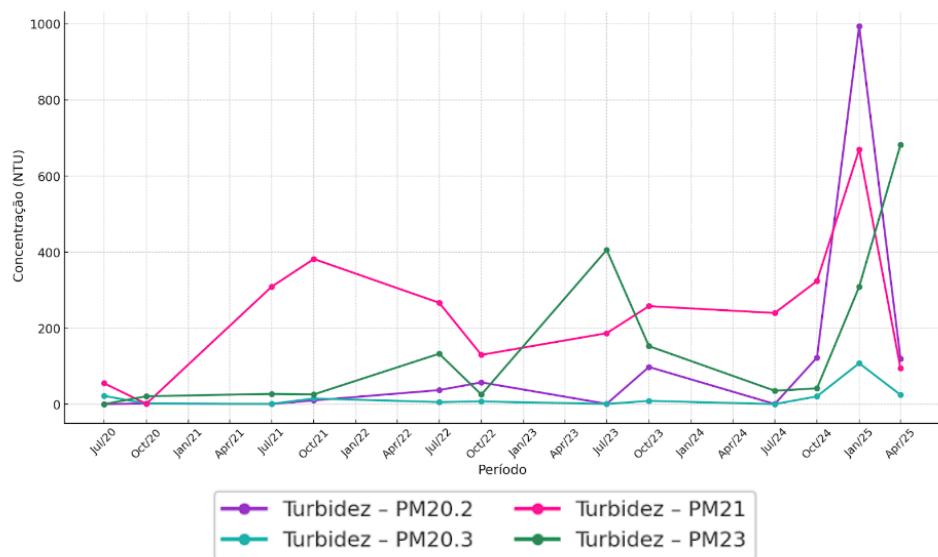
No Grupo 2 (PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3) a turbidez segue padrão de oscilação, mas com valores um pouco menos extremos que o grupo anterior. O PM17.1 apresenta episódios de turbidez alta, sugerindo instabilidade físico-química localizada. PM16.2 e PM16.3 apresentam elevações moderadas, e o PM17.3 mostra comportamento mais atenuado.

No Grupo 3 (PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19, PM20.1) a turbidez é um indicador crítico: PM18.1 e PM18.3 apresentam valores muito altos, sugerindo infiltrações contendo

materiais suspensos. O PM19 mantém padrão intermediário, com episódios agudos. O PM20.1 apresenta turbidez alta e recorrente.

No Grupo 4 (PM20.2, PM20.3, PM21, PM23) a turbidez também mantém níveis críticos. Os PM20.2 e PM20.3 exibem elevadas oscilações, enquanto PM21 demonstra episódios de turbidez extremos, reforçando sua susceptibilidade à recarga superficial. O PM23 apresenta menores amplitudes, mas ainda acima do esperado para águas subterrâneas naturais.

Figura 6.33 - Concentração de Turbidez em PM20.2, PM20.3, PM21, PM23



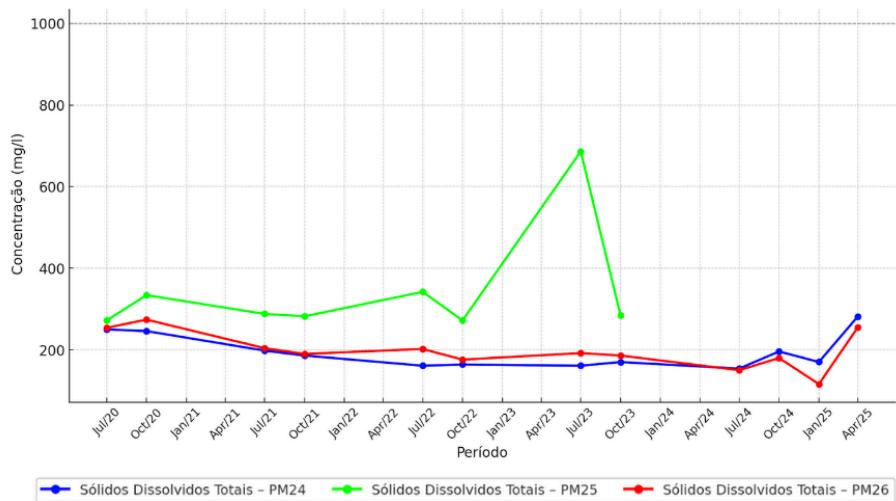
Fonte: Autora, 2025.

6.3.5 Análises PM24, PM25 e PM26

6.3.5.1 Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Nos pontos de monitoramento PM24, PM25 e PM26, observa-se um comportamento diferenciado quanto aos Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), refletindo a intensidade variável da influência hidrogeoquímica das Células de Ampliação AC-3, AC-4 e AC-5 encerradas em 2006.

Figura 6.34 - Concentração de Turbidez em PM24, PM25 e PM26



Fonte: Autora, 2025

O PM24 e o PM26 apresentam níveis moderados de SDT, variando em uma faixa típica de águas subterrâneas com influência antrópica leve a moderada, enquanto o PM25 registra valores significativamente mais elevados, alcançando aproximadamente 686 mg/L em determinadas análises.

Em condições naturais, águas subterrâneas de aquíferos protegidos tendem a exibir SDT mais estáveis e baixos, determinados principalmente pela litologia e pela maturidade do escoamento subterrâneo. A elevação observada em PM25 indica maior presença de sais dissolvidos oriundos da degradação temporal do lixiviado, que, mesmo após a fase ativa do aterro, continua liberando íons majoritários como sódio, potássio, magnésio e cloreto (Christensen et al. 2001 e Kjeldsen et al. 2002).

6.3.5.2 DBO, DQO e OD

Os três poços apresentam um quadro típico de presença de matéria orgânica residual associada ao aterro sanitário. A DBO apresenta valores entre aproximadamente 2 e 5 mg/L, o que é consideravelmente elevado para águas subterrâneas, que normalmente exibem valores próximos a zero.

A DQO, variando entre 20 mg/L e cerca de 40 mg/L, especialmente em PM26, sugere a presença de compostos orgânicos não biodegradáveis. A diferença entre DQO e DBO sugere que grande parte da matéria orgânica remanescente é refratária, sendo degradada

apenas muito lentamente ao longo dos anos, característica típica de aterros antigos que já perderam boa parte da fração biodegradável.

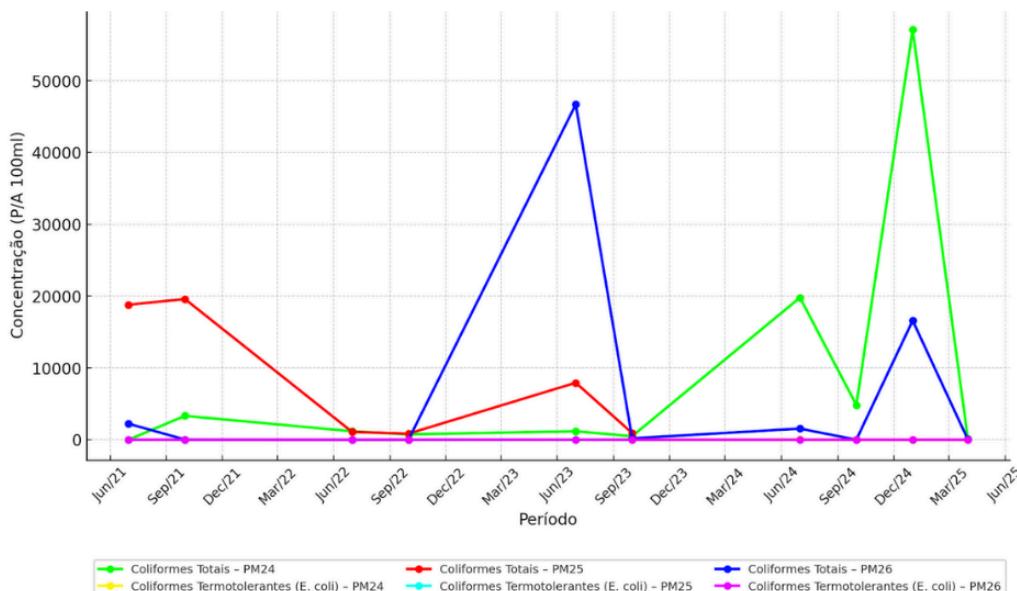
O comportamento do Oxigênio Dissolvido - OD reforça essa interpretação: PM24 e PM25 apresentam valores críticos, chegando a 0,2 mg/L, caracterizando ambientes anóxicos. O PM26, embora apresente valores mais elevados, cerca de 5 mg/L, ainda oscila significativamente, indicando variação sazonal e influência de processos oxidativos heterogêneos no aquífero.

A Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008) indica que águas subterrâneas de boa qualidade apresentam estabilidade em seus indicadores físico-químicos, o que se verifica aqui à exceção de alguns picos verificados ao longo do tempo.

6.3.5.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*)

Os resultados microbiológicos indicam forte comprometimento sanitário dos três poços, com maiores incidências nos PM24 e PM25 (Figura 58).

Figura 6.35 - Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*) em PM24, PM25 e PM26



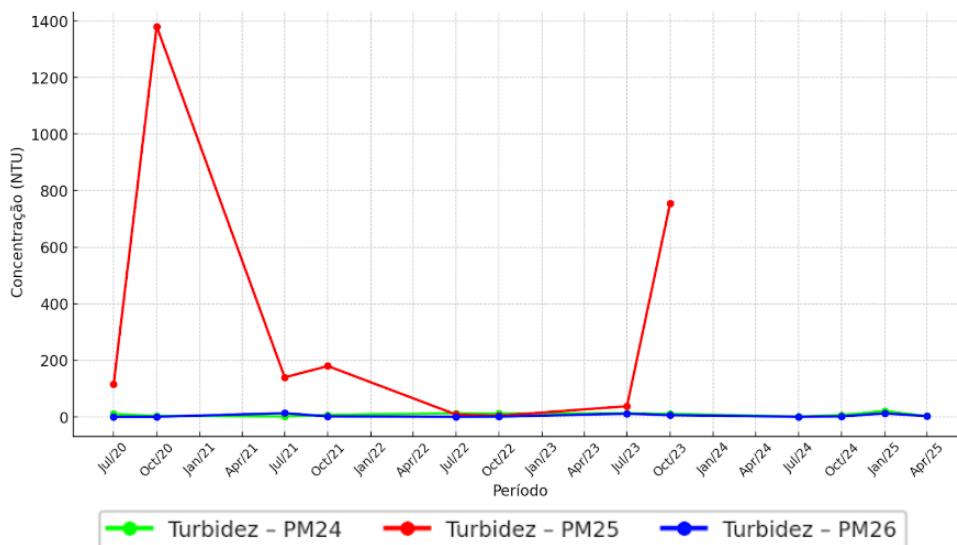
Fonte: Autora, 2025.

A Figura 6.35 evidencia que os Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. coli*) estiveram presentes nos pontos PM24, PM25 e PM26 ao longo da série histórica analisada, com variações temporais marcantes nas concentrações. Destacam-se picos expressivos, especialmente em PM25 e PM26, indicando episódios pontuais de maior apporte microbiológico, possivelmente associados a condições hidrológicas específicas, como períodos de maior recarga ou mobilização de contaminantes no aquífero. Em contrapartida, nos demais períodos, as concentrações apresentam valores reduzidos, efeito influenciado pela escala do eixo vertical condicionada pelos valores máximos, o que não representa ausência do parâmetro.

6.3.5.4 Turbidez

A turbidez apresenta um dos cenários mais críticos entre os parâmetros avaliados. No caso do PM25, os valores variam desde pouco mais de 4 NTU até picos superiores a 1300 NTU, evidenciando forte instabilidade física da água subterrânea.

Figura 6.36 - Turbidez em PM24, PM25 e PM26



Fonte: Autora, 2025.

Em PM24 e PM26, embora exibam amplitudes menores, ainda registram turbidez acima de 10–20 NTU em diversas campanhas, o que não é compatível com condições naturais de aquíferos, onde se esperam valores muito próximos de zero devido ao processo de filtração natural. A turbidez registrada nos três pontos, principalmente no PM25, é totalmente incompatível com a Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece limites muito baixos

para turbidez em sistemas destinados ao consumo humano.

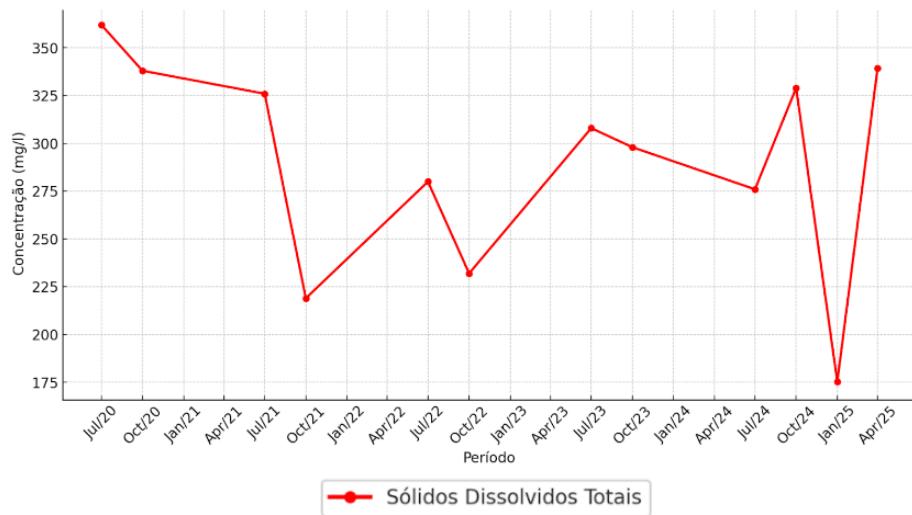
6.3.6 Análises PM21

O ponto de monitoramento PM21 foi analisado de forma individualizada em razão de sua localização externa ao aterro sanitário, inserida em área urbana adjacente. Essa condição confere características ambientais e hidrogeológicas distintas em relação aos demais pontos de monitoramento. Assim, a análise específica do PM21 visa proporcionar uma interpretação mais precisa dos resultados obtidos.

6.3.6.1 Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Os valores de SDT observados em PM21 mantêm-se dentro de um padrão relativamente estável e mais baixo em comparação aos poços internos e aos pontos mais impactados, como PM25 e PM26.

Figura 6.37 - Concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) em PM21



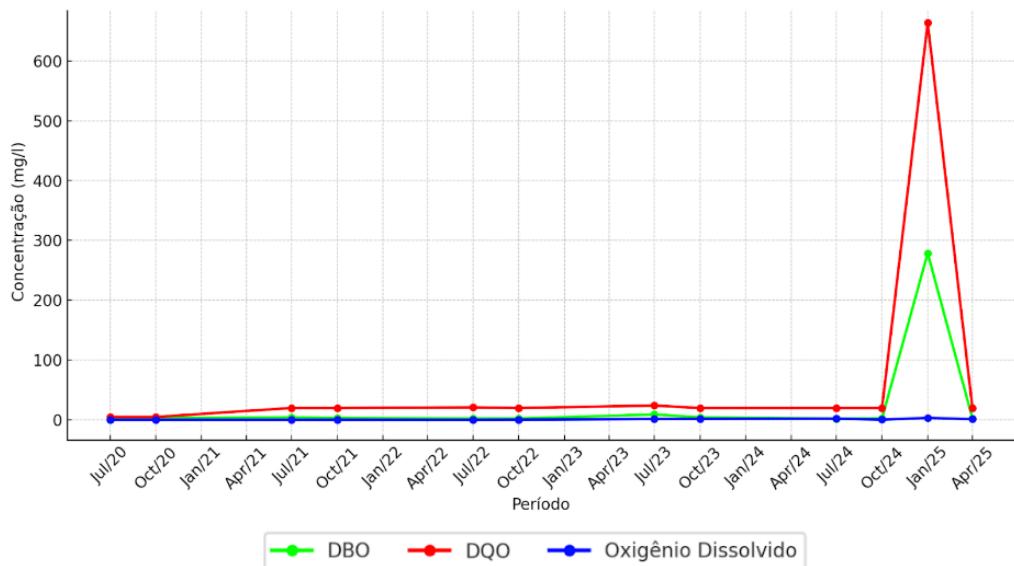
Fonte: Autora, 2025.

Quando comparado aos demais PMs, o PM21 apresenta valores estatisticamente superiores para parâmetros indicativos de poluição por matéria orgânica, corroborando a hipótese de deslocamento direcional do fluxo subterrâneo a jusante (CATAPRETA et al., 2021). A predominância de sólidos dissolvidos totais acima do VMP, associada à presença oscilante de nitrogênio amoniacal, indica processo ativo de mineralização e liberação iônica, semelhante aos cenários descritos por Santos et al. (2020) para plumas de contaminação em aterros antigos.

6.3.6.2 DBO, DQO e OD

A análise conjunta de DBO, DQO e OD em PM21 revela um quadro hidrogeoquímico significativamente mais equilibrado do que nos demais poços dentro do aterro (Figura 4.38).

Figura 6.38 - Concentração de DBO, DQO e OD em PM21



Fonte: Autora, 2025.

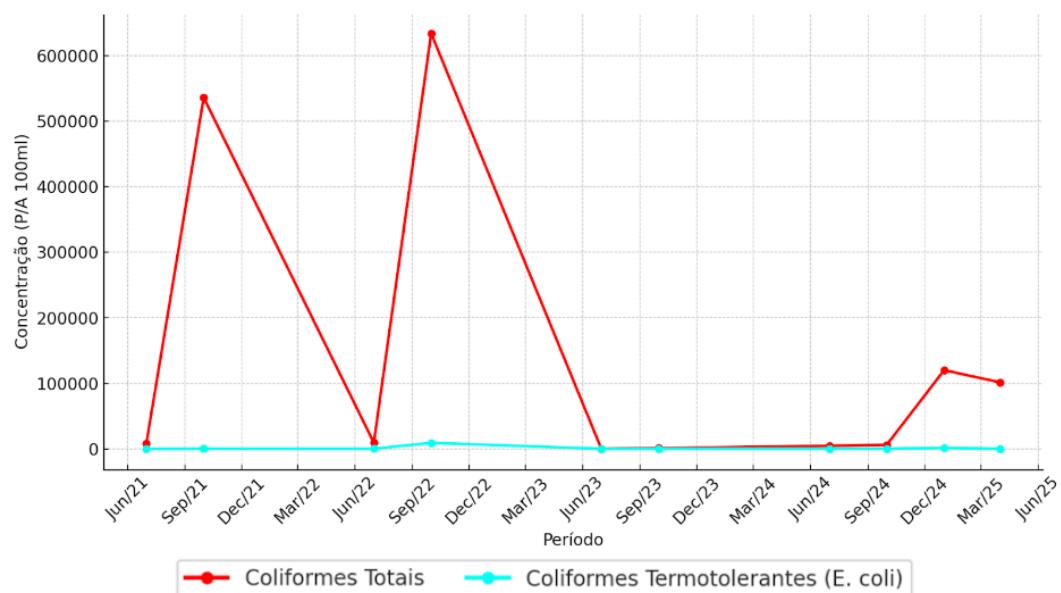
A DBO apresenta valores baixos, próximos de zero, refletindo a ausência de aporte de matéria orgânica biodegradável, característica fundamental de águas subterrâneas não impactadas por lixiviado fresco. A DQO também se mantém em níveis reduzidos, indicando que frações orgânicas recalcitrantes, típicas do lixiviado antigo, não estão presentes em concentração relevante neste local. Ambos apresentam picos pontuais registrados apenas em janeiro/2025.

O CONAMA 396/2008 destaca que águas subterrâneas de boa qualidade tendem a apresentar estabilidade físico-química, exatamente o padrão exibido pela PM21.

6.3.6.3 Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*)

Os resultados de Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*) em PM21 observou-se “Presença” em todos as análises, porém com pico acentuado somente para coliforme totais nos meses de setembro de 2021 e 2022. O gráfico possui escalas de valores muito grandes, variando entre 0 à 600.000mg/l. Desta forma, as linhas de dados aparentam estar em 0 absoluto, contudo, todos os meses amostrados obteve presença de Coliformes Totais e Termotolerantes.

**Figura 6.39 - Concentração de Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*)
em PM21**



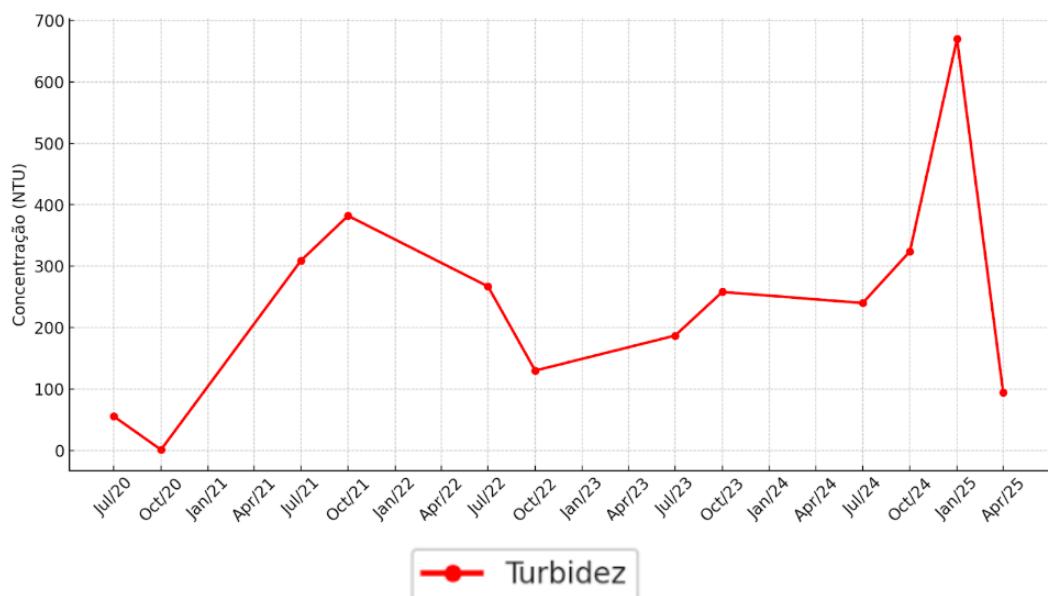
Fonte: Autora, 2025.

A presença de Coliformes Totais e Termotolerantes, ainda que em quantidade baixa, não atende às exigências sanitárias brasileiras, que determinam ausência obrigatória desse parâmetro em água destinada ao consumo humano (BRASIL, 2021). Assim, PM21 funciona como um indicador de referência da qualidade da água subterrânea, permitindo afirmar que, fora dos limites do aterro, a contaminação microbiológica ainda é muito significativa.

6.3.6.4 Turbidez

A turbidez no PM21 é relativamente baixa ao longo da série temporal, apresentando pequenas oscilações compatíveis com variações naturais do aquífero próximas a zonas urbanizadas.

Figura 6.40 - Concentração de Turbidez em PM21



Fonte: Autora, 2025.

Essa condição é coerente com um ponto de monitoramento mais protegido da recarga direta de água superficial contaminada, ao contrário do que ocorre nos poços mais próximos à Lagoa e às drenagens internas do aterro.

O PM21 se diferencia positivamente dos demais pontos, sugerindo uma condição ambiental mais estável e menos vulnerável à infiltração de águas superficiais contaminadas, podendo considerar que, ainda que ocorra contaminação direta pelo lixiviado do aterro ao lençol freático, a autodepuração e recuperação da água ocorre de forma efetiva sem que haja impacto gerado pelo aterro ao longo do córrego Ressaca.

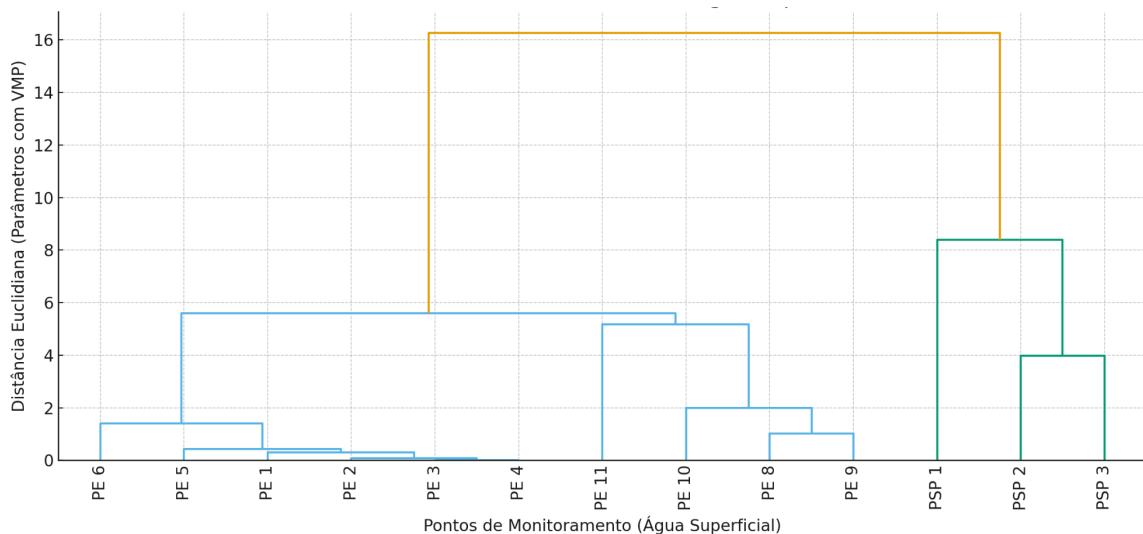
7. DISCUSSÃO

7.1 Água Superficial

Mediante os Valores Máximos Permitidos - VMP estabelecidos na Resolução CONAMA

nº 357 (BRASIL, 2005), a análise de agrupamento (cluster) revelou a organização espacial da qualidade da água superficial nos pontos PSP, Lagoa e PE. O dendrograma gerado com base nesses parâmetros normativos, sendo como Coliformes Termotolerantes, Sólidos Dissolvidos Totais, Nitrogênio Amoniacal, DBO e Turbidez, permitiu identificar os pontos mais críticos do sistema hídrico monitorado.

Figura 7.51 - Dendrograma Cluster: Parâmetros com VMP



Fonte: Autora, 2025.

Os resultados demonstraram que os pontos PSP 1, PSP 3, PSP 2, PE 8 e PE 9 se destacam como aqueles com maior número de ultrapassagens aos VMPs, formando um agrupamento fortemente associado a condições de degradação ambiental. A presença recorrente de Coliformes Termotolerantes, com VMP estabelecido legislado como “ausente”, reforça o comprometimento sanitário desses pontos.

A Resolução CONAMA nº 357 estabelece que corpos d’água superficiais de Classe 2, categoria a que se enquadra o local do aterro, devem apresentar “ausência” de Coliformes Termotolerantes para usos de contato primário e secundário, devendo ser avaliados segundo critérios de risco microbiológico.

A ocorrência constante deste indicador nos pontos críticos evidencia contribuição significativa de despejos orgânicos (folhas de árvores em decomposição, fezes de animais que circulam pela área etc.), percolação de águas contaminadas provenientes da drenagem pluvial do aterro (ex.: arraste de fezes de animais e solos diversos) e processos erosivos que

transportam material microbiologicamente ativo para os corpos hídricos.

Além do componente microbíologico, o agrupamento também refletiu a influência de parâmetros físico-químicos de alta relevância regulatória. Os níveis de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e de Manganês, amplamente excedidos nos pontos críticos citados, reforçam o padrão de degradação. A CONAMA nº 357 (Brasil, 2005) estabelece VMPs estritos para esses parâmetros, considerando seus efeitos sobre o equilíbrio ecológico e o uso da água para abastecimento e recreação. A elevação de SDT e Manganês nos pontos superficiais mais degradados é consistente com o aporte de material dissolvido oriundo da drenagem superficial do aterro (CHRISTENSEN ET AL., 2001 E KJELDSEN ET AL., 2002).

Outro conjunto de parâmetros que contribuiu fortemente para a segregação dos pontos mais críticos no dendrograma foi o de compostos nitrogenados (Nitrato, Nitrito e Nitrogênio Ammoniacal). Esses compostos, além de constituírem indicadores clássicos de contaminação por matéria orgânica em decomposição, possuem VMPs rígidos justamente devido ao risco sanitário que representam. A CONAMA 357 (Brasil, 2005) estabelece 10 mg/L para Nitrato e 1 mg/L para Nitrito. As excedências observadas em PSP 1 e PSP 3 indicam a ocorrência de processos oxidativos e redutivos intensos, típicos da chegada de águas com alto teor de nitrogênio total.

Em contraste com o grupo crítico, o dendrograma evidenciou um conjunto de pontos com menor intensidade de contaminação, tais como PSP 4, PE 1, PE 2, PE 3, PE 4, PE 5 e PE 6, que se agruparam em ramos superiores e distantes dos demais, indicando menor número de violações normativas. Estes pontos apresentaram concentrações menores de nutrientes, metais e coliformes, sugerindo que se encontram em áreas de menor recepção direta de cargas poluentes oriundas do aterro. A Lagoa apresentou comportamento intermediário, com algumas excedências.

É importante destacar que, durante a execução do método, também foi construído um dendrograma contendo todos os parâmetros, incluindo aqueles sem VMP, como Coliformes Totais, Condutividade Elétrica e DQO. No entanto, a comparação entre os agrupamentos revelou que o dendrograma composto por todos os parâmetros apresentou praticamente o mesmo arranjo espacial observado no dendrograma composto apenas por parâmetros com VMP. Isso ocorre porque a variabilidade dominante entre os pontos superficiais é explicada majoritariamente pelos parâmetros que já possuem VMP.

7.1.1 Efeitos da Sazonalidade na Água Superficial

Nas águas superficiais, a sazonalidade exerce forte influência devido ao contato direto entre o corpo d'água e o escoamento superficial oriundo da área do aterro sanitário. A diferença entre o período chuvoso e o seco é marcante em termos microbiológicos e físicos. Segundo a Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005), eventos de precipitação representam fator crítico para o aumento de carga microbiológica e de sólidos em suspensão em corpos hídricos superficiais.

Durante o período chuvoso, ocorrem picos intensos de coliformes termotolerantes, sobretudo em PSP 1, PSP 3, PSP 2, PE 8 e PE 9, os quais recebem grande contribuição de drenagem e escoamento superficial do aterro. Da mesma forma, parâmetros como turbidez, SDT, condutividade, nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito apresentam aumentos consideráveis, evidenciando a maior mobilização de sedimentos, matéria orgânica e nutrientes.

No período seco, observa-se redução relativa de coliformes e turbidez, devido à menor carga de escoamento. Entretanto, o processo de evaporação e a diminuição do nível d'água podem promover concentração de íons dissolvidos, elevando valores de SDT, ferro, manganês e nitrogênio amoniacal em diversos pontos superficiais. Esse padrão indica que, embora o período seco reduza o aporte microbiológico, ele intensifica aspectos químicos. A Lagoa, por ser um corpo lêntico, demonstra comportamento intermediário com picos microbiológicos durante chuvas e aumento de SDT no período seco.

7.2 Águas Subterrâneas

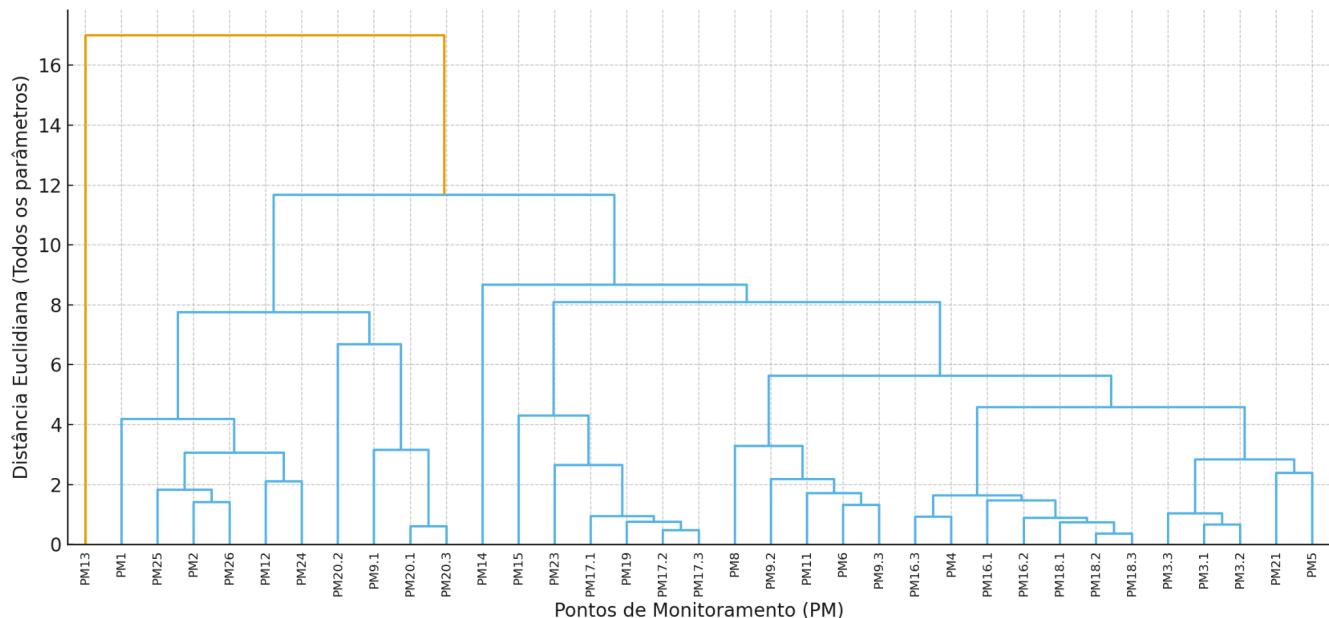
A análise de agrupamento hierárquico aplicada aos pontos de monitoramento permitiu compreender com maior profundidade a organização hidrogeoquímica das águas subterrâneas associadas ao aterro sanitário, revelando padrões que não seriam perceptíveis a partir da análise isolada dos parâmetros.

De acordo com Von Sperling (2014), métodos multivariados possibilitam identificar conjuntos de amostras que compartilham características comuns influenciadas por processos ambientais semelhantes, sendo, portanto, especialmente úteis em estudos de contaminação em aquíferos. Nesse sentido, foram construídos dois dendrogramas: Cluster A, utilizando todos os parâmetros físico-químicos e microbiológicos numéricos disponíveis, ainda que muitos não possuíssem Valor Máximo Permitido e Cluster B, incluindo exclusivamente os parâmetros com VMP definidos na coluna específica da planilha, conforme previsto pela Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008) e pela

Portaria GM/MS nº 888 (BRASIL, 2021).

No dendrograma do Cluster A (Figura 5.2), observou-se a formação de um agrupamento consistente envolvendo os poços PM13, PM15, PM23, PM20.1, PM20.2, PM25 e PM26. Esses pontos apresentaram valores caracteristicamente elevados de sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica, cloreto, nitrato, nitrito, turbidez, DBO e DQO, além de registros frequentes de coliformes. Aterros em operação ou em fase pós-operacional tendem a gerar lixiviados com altas concentrações de íons dissolvidos, matéria orgânica residual e nitrogênio em formas oxidáveis (CHRISTENSEN et al., 2001; KJELDSEN et al., 2002), o que está em consonância com o comportamento encontrado nesses PMs.

Figura 7.2 - Dendrograma Cluster A: Conjunto dos parâmetros disponíveis



Fonte: Autora, 2025.

A similaridade entre PM13, PM15, PM23, PM20.1, PM20.2, PM25 e PM26 indica que todos compartilham uma mesma influência geoquímica, muito provavelmente associada à percolação de lixiviado das células AC-3, AC-4 e AC-5, encerradas em 2006.

Um aspecto de destaque no Cluster A é a posição isolada do PM13, que aparece no topo do dendrograma. Embora isso possa ser interpretado equivocadamente como indício de menor contaminação, na verdade significa que o PM13 possui concentrações ainda mais extremas

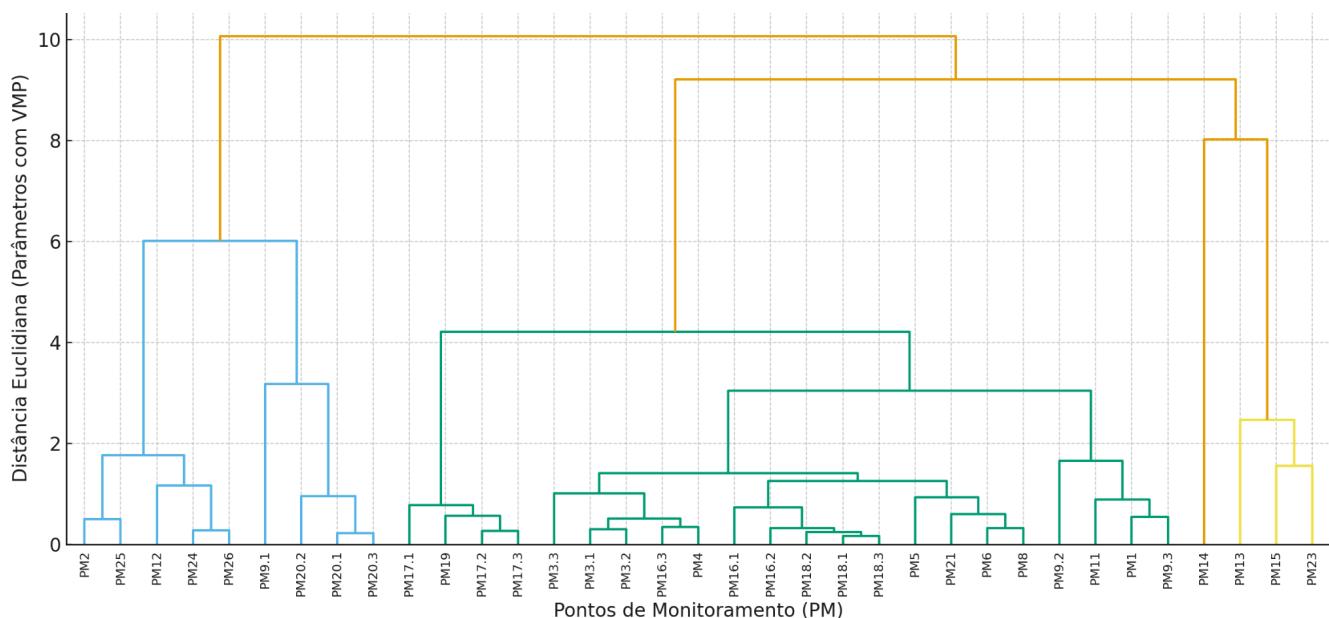
de vários parâmetros. Em análises multivariadas, amostras altamente degradadas tendem a se afastar estatisticamente do restante, formando clusters singulares exatamente por apresentarem valores fora da faixa observada nos demais grupos (VON SPERLING, 2014). Assim, PM13 deve ser entendido como um dos poços mais contaminados de todo o sistema, funcionando como um indicador de pior cenário.

O PM21 aparece sempre afastado dos demais em apresentar melhores condições se comparado com os demais nos mesmos parâmetros analisados, contudo ainda possui concentrações significativas para água subterrânea.

O Cluster B, foi construído unicamente com parâmetros que possuem VMP e, portanto, diretamente vinculados à conformidade legal. Esse agrupamento permite identificar não apenas similaridade hidrogeoquímica, mas, sobretudo, quais PMs violam com maior frequência os limites estabelecidos pela legislação. A Resolução CONAMA nº 396/2008 estabelece que águas subterrâneas destinadas a consumo humano devem apresentar padrões restritos, incluindo nitrato inferior a 10 mg/L e ausência de Coliformes Termotolerantes em 100 mL, sendo parâmetros microbiológicos e nitrogenados os mais críticos para avaliar riscos sanitários (CONAMA, 2008).

Da mesma forma, a Portaria GM/MS nº 888 (BRASIL, 2021) determina que a presença de *Escherichia coli* em qualquer amostra de água destinada ao consumo humano constitui violação imediata de potabilidade, reforçando a gravidade da ocorrência microbiológica em aquíferos.

Figura 7.3 - Cluster B - Conjunto dos parâmetros que possuem VMP



Fonte: Autora, 2025.

A análise do Cluster B revela que os mesmos PMs críticos identificados no Cluster A, sendo PM13, PM15, PM23, PM20.1 e PM20.2, também são aqueles que mais ultrapassam os VMPs normativos, confirmando a presença recorrente de E. Coli, nitrato acima de 10 mg/L, cloreto e SDT acima dos limites permitidos. Essa convergência entre os dois modelos estatísticos indica que tais PMs apresentam simultaneamente alta degradação hidrogeoquímica e não conformidade legal. Essa consistência fortalece a interpretação de que a contaminação não é um evento isolado ou circunstancial, mas sim um processo persistente e espacialmente bem definido.

Os demais poços, como os agrupados em posições intermediárias no dendrograma, sendo PM16.1, PM16.2, PM16.3, PM17.1, PM17.2, PM17.3, PM18.1, PM18.2, PM18.3, PM19 e PM24, apresentam padrão heterogêneo. Eles exibem valores mais elevados que PM21, embora este ainda esteja com altas concentrações para águas subterrâneas.

O comportamento intermediário está de acordo com estudos que indicam que plumas de lixiviados apresentam heterogeneidade espacial significativa, com zonas de maior concentração e áreas de diluição conforme interações com o aquífero (KJELDSEN et al., 2002).

A leitura integrada dos Clusters A e B demonstra que a contaminação subterrânea

apresenta três zonas bem definidas: um centro altamente impactado (PM13, PM15, PM23, PM20.1, PM20.2, PM25 e PM26), uma zona intermediária (PM16.1-3, PM17.1-3, PM18.1-3, PM19 e PM24) e uma zona de referência externa (PM21). Essa organização reforça que o monitoramento possui coerência interna e espacial, permitindo identificar tanto a origem quanto a intensidade das alterações verificadas na qualidade das águas subterrâneas. A convergência entre parâmetros normativos e não normativos fortalece a hipótese de influência direta da percolação de lixiviado antigo, o que é coerente com a idade das células e o histórico operacional do aterro.

7.2.1 Efeitos da Sazonalidade na Água Subterrânea

A influência da sazonalidade sobre a qualidade das águas subterrâneas na área do aterro sanitário apresenta-se de forma marcante durante os meses de julho de 2020 e julho de 2025.

O período chuvoso (novembro a março) atua como principal atenuador de recarga do aquífero, enquanto o período seco (abril a outubro) intensifica as concentrações das substâncias. Conforme Christensen et al., (2001), a resposta subterrânea à precipitação é lenta e amortecida devido ao tempo necessário para infiltração, percolação e interação solo-rocha, a chegada de água meteórica ao sistema subterrâneo promove a remobilização de íons, aumentando temporariamente a carga iônica de águas contaminadas por aterros.

Durante o período chuvoso, verifica-se aumento significativo de SDT, condutividade elétrica, nitrogênio amoniacal, turbidez e, em alguns PMs, de nitrato e nitrito. Esse comportamento ocorre porque a infiltração de águas pluviais mobiliza compostos presentes nas camadas superiores do aterro e os transporta para o aquífero. Conforme Kjeldsen et al. (2002), a recarga induzida por precipitação intensifica a transformação e o transporte de compostos nitrogenados no entorno de aterros sanitários, sendo este padrão compatível com o observado em PMs como PM13, PM20.2, PM23 e PM25, que apresentam incrementos expressivos no período úmido.

Por outro lado, no período seco, ocorre redução da recarga e consequente concentração de solutos devido ao menor aporte hídrico, intensificando a presença de contaminantes como cloreto, SDT, manganês, nitrato e compostos orgânicos (DBO/DQO). Von Sperling (2014), destaca que a redução de recarga intensifica a concentração de poluentes em aquíferos impactados, reduzindo a capacidade de autodepuração. Os PMs localizados em áreas mais

vulneráveis, como PM20.1, PM20.2, PM23 e PM26, apresentam valores mais elevados e com menores variáveis ao longo do período seco.

7.2.2 Análise do PM21 conforme PORTARIA GM/MS Nº 888/2021

O ponto de monitoramento PM21 apresentou um comportamento hidroquímico consistente com áreas impactadas, fato observado pela elevação recorrente de Coliformes Totais e Termotolerantes, Turbidez e Manganês, conforme sintetizado na Tabela 5.1. Esses resultados evidenciam que o PM21 se destaca entre os demais por se tratar de um ponto fora da área do aterro e possuir concentrações fora dos limites permitidos estabelecidos para águas subterrâneas, sugerindo influência direta de cargas contaminantes originadas das zonas antigas do aterro.

Tabela 7.1 - Comparativo das Análises do Aterro da Prefeitura de Belo Horizonte com a Portaria GM/MG nº 888/2021

| Parâmetro | VMP | Und. | Resultados de análise PM21 – Dados SLU | | | | | | | | | | | | Portaria GM/MG nº 888/2021 |
|----------------------------|---------|-----------|--|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------------------------|
| | | | Jul/2020 | Out/2020 | Jul/2021 | Out/2021 | Jul/2022 | Out/2022 | Jul/2023 | Out/2023 | Jul/2024 | Out/2024 | Jan/2025 | Abr./2025 | |
| Coliformes Termotolerantes | Ausente | PA/100 ml | Presentes | Presentes | <1 | 137,4 | 125,9 | 9070 | <1 | 5,2 | 100 | 84 | 1410 | <1 | Ausência em 100 ml |
| Coliformes Totais | Ausente | PA/100 ml | Presentes | Presentes | 8020 | 536000 | 9330 | 634000 | 40,2 | 1090 | 4500 | 6100 | 120000 | 101400 | Ausência em 100 ml |
| Turbidez | NA | NTU | 55,5 | 1,19 | 309 | 382 | 267 | 130 | 187 | 258 | 240 | 324 | 670 | 94,7 | ≤ 1,0 UNT |
| Manganês | 0,1 | mg/l | 0,277 | 0,432 | 0,57 | 0,23 | 0,429 | 0,327 | 0,39 | 0,384 | 0,48 | 0,43 | 0,546 | 0,365 | ≤ 0,1 mg/l |

Fonte: Autora, 2025

Ao confrontar os valores observados com os requisitos da Portaria GM/MS nº 888/2021, verifica-se que o PM21 não atende aos padrões de potabilidade, sobretudo pela presença intermitente de E. coli, o que, segundo a legislação, torna a água imediatamente imprópria para consumo humano. Além disso, concentrações elevadas de sólidos dissolvidos totais, excedendo o limite de 500 mg/L, indicam alteração sensorial, potencial impacto sistêmico prolongado e redução da aceitação para consumo.

8. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que os corpos d'água monitorados apresentam comportamentos distintos conforme sua localização, histórico da área e proximidade com células impermeabilizadas ou não impermeabilizadas. Os pontos PSP 3 e PSP 4, inseridos em áreas encerradas entre 1962 e 1978 sem impermeabilização, apresentaram maior instabilidade em parâmetros como sólidos dissolvidos, condutividade e nitrogênio, indicando influência potencial de percolação residual e remobilização de materiais antigos.

Em contrapartida, os pontos PSP 1, PE 8, PE 9 e PE 10, localizados a jusante da área impermeabilizada (Ampliação, AC-03, AC-04 e AC-05), exibiram padrões mais regulares, ainda que alguns parâmetros tenham ultrapassado limites normativos, especialmente em períodos de estiagem.

Os Pontos de Monitoramento Subterrâneos - PMs próximos da célula impermeabilizada apresentaram valores compatíveis com águas subterrâneas pouco impactadas, sugerindo eficiência da impermeabilização com argila compactada.

A análise integrada revelou também que a sazonalidade pluviométrica exerce forte influência: períodos secos concentraram cloretos e sólidos, enquanto períodos chuvosos mostraram diluição, embora possam aumentar o transporte superficial em áreas não impermeabilizadas.

O uso de análises estatísticas, como o agrupamento (Cluster) permitiu identificar agrupamentos críticos e diferenças significativas entre pontos, reforçando a necessidade de manter o monitoramento ambiental contínuo e de aprimorar estratégias de isolamento das áreas antigas do aterro.

O estudo confirma a relevância do acompanhamento sistemático das águas superficiais e subterrâneas, nas áreas impermeabilizadas e principalmente não impermeabilizadas, requerendo ações além da gestão contínua.

A recuperação da qualidade da água do córrego Ressaca é de extrema relevância, visto que esta sub-bacia percorre áreas densamente povoadas da Região Noroeste de Belo Horizonte. Nesse sentido, a redução dos eventuais impactos causados pelo aterro sanitário da BR-40 contribui diretamente para a melhoria da saúde ambiental desses territórios,

reduzindo riscos sanitários associados ao contato com águas poluídas e fortalecendo o papel dos cursos d'água como elementos estruturadores da paisagem urbana.

Medidas de mitigação e recuperação reforçam a valorização ambiental da área e possibilitam que, no futuro, espaços hoje degradados sejam reintegrados ao cotidiano da população, especialmente considerando projetos como o Parque CTRS BR-040, previsto pela Prefeitura de Belo Horizonte, 2008.

A ausência de barreiras de base e de cobertura acelera a infiltração da chuva no corpo de resíduos, o que aumenta a formação de lixiviado e o transporte de contaminantes (KJELDSEN ET AL., 2002). Assim, a primeira e mais urgente medida para mitigação dos impactos consiste na redução da percolação de água na massa de resíduos antigos, o que pode ser alcançado por meio de uma impermeabilização de superfície com argila compactada nos aterros encerrados que iniciaram seu funcionamento como aterro convencional. Essa camada reduz significativamente a infiltração e minimiza a dissolução e a mobilização de íons e matéria orgânica, contribuindo para a redução gradual das concentrações nos córregos a jusante.

As áreas antigas de disposição de resíduos no aterro sanitário da BR-040 não receberam essa cobertura final com material impermeabilizante, mas já foram requalificadas ambientalmente. As áreas que estiveram em operação a partir de meados dos anos 90 receberam cobertura final com argila.

A instalação de sistemas de drenagem e desvio de águas pluviais é essencial para impedir que a chuva continue se acumulando e infiltrando nas áreas críticas. Embora simples, a drenagem superficial possui grande eficiência na diminuição da carga hidráulica, reduzindo o fluxo de contaminantes para os corpos d'água próximos. Essa técnica também evita erosão, instabilidade do terreno e carreamento de sólidos e matéria orgânica.

A longo prazo, a solução de maior impacto corretivo seria a impermeabilização completa das áreas antigas do aterro, com argila compactada e geomembrana. Segundo a CETESB (2023), geomembranas de PEAD associadas a camadas de solo argiloso podem reduzir a permeabilidade da base a valores inferiores a 10^{-9} m/s. Essa medida representaria a estabilização definitiva da área, evitando futuras contaminações.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREMA. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023*. São Paulo: Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama2023>. Acesso em: 4 jul. 2025.
- APHA – American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22. ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2012.
- ARAÚJO, L. M.; SILVA, F. R.; SOUZA, P. A. Impactos da Infiltração de Lixiviado na Qualidade do Solo e da Água: uma Revisão Sistemática. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 57, n. 2, p. 123-134, 2022.
- BACELLAR, L. A. P.; CATAPRETA, C. A. A. Emprego de eletrorresistividade para delimitação de pluma de contaminação por líquidos lixiviados no aterro sanitário de Belo Horizonte. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL*, 2023, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: UFOP, 2023.
- 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, 2005.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2008.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2021.
- BRAZ, A. M. et al. Análise de agrupamento (cluster) para tipologia de unidades de paisagem. *Mercator*, v. 19, n. 1, 2020.
- CATAPRETA, Cícero Antônio Antunes; COELHO, Júlia Rodrigues Barroso; CARVALHO, Rafael Soares; DAMACENO, Vitor Rosa; SILVA, Patrícia Costa e. Avaliação da qualidade das águas superficiais na área de influência do aterro sanitário de Belo Horizonte. In: *XII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, Salvador, 08–11 nov. 2021. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2021. 7 p.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Qualidade das Águas Inteiros no Estado de São Paulo – Apêndice D: Normas e Padrões*. São Paulo: CETESB, 2016.
- CETESB. *Apêndice de Valores Orientadores*. São Paulo, 2023.
- CHRISTENSEN, T. H. et al. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, v. 16, n. 7-8, p. 659–718, 2001.
- COPAM. Deliberação Normativa nº 20, de 24 de junho de 1997.
- COSTA, R. S.; MOURA, M. F.; PEREIRA, V. C. Contaminação Ambiental por Lixiviado: Diagnóstico e Propostas de Intervenção. *Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 45-60, 2021.

FARIA, R. P.; OLIVEIRA, G. F.; ALMEIDA, J. F. Contaminação de Águas Subterrâneas por Lixiviado: Riscos à Saúde Pública e ao Meio Ambiente. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. 3, p. e67, 2020.

HE, R. et al. Toxic effects of leachate on aquatic environments and risk control. *Environmental Pollution*, Oxford, v. 248, p. 228–237, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual Técnico de Recursos Hídricos*. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2023*. Brasília: IBGE, 2023.

KJELDSEN, P. et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, New York, v. 32, n. 4, p. 297–336, 2002.

KJELDSEN, P. et al. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate. *Environmental Science and Technology*, 2002.

LIMA, J. S.; FERREIRA, D. O.; OLIVEIRA, A. L. Avaliação dos Riscos Ambientais em Aterros Sanitários Próximos a Comunidades Vulneráveis. *Cadernos de Geografia*, v. 33, n. 1, p. 58-72, 2023.

LOPES, A. P.; SILVA, M. T.; REIS, V. P. Efeitos da Contaminação de Águas Subterrâneas por Lixiviado na Saúde Pública: Revisão de Literatura. *Revista Saúde & Ambiente*, v. 17, n. 1, p. 22-36, 2022.

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

PBH — Prefeitura de Belo Horizonte. *Relatórios Técnicos do Aterro Sanitário de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, 2018, 2020.

PEREIRA, G. M.; SANTOS, L. C.; BARBOSA, J. F. Diagnóstico Ambiental do Aterro Sanitário 040 de Belo Horizonte e Seus Impactos Socioambientais. *Revista Mineira de Engenharia Sanitária*, v. 15, n. 3, p. 200-215, 2023.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. *Córrego Ressaca: intervenções para ampliação da capacidade de escoamento e mitigação de inundações*. Belo Horizonte: PBH, [s.d.], 5 p.

PREFEITURA DE BELO HORIZONTE. *Plano de Manejo da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040*. Belo Horizonte: SLU, 2018. 85 p.

RENOU, S. et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v. 150, n. 3, p. 468–493, 2008.

SANTOS, A. P.; OLIVEIRA, E. R.; MATTOS, J. P. Caracterização do Lixiviado e Seus Efeitos no Meio Ambiente. *Revista de Engenharia Ambiental*, v. 17, n. 2, p. 45-59, 2020.

SANTOS, A.; SILVA, R.; ALMEIDA, M. *Métodos Estatísticos Aplicados à Qualidade da Água*. 2020.

SILVA, F. J.; COSTA, E. M.; SOUSA, L. A. Alterações Físico-Químicas e Biológicas do 86

Solo Contaminado por Lixiviado: Implicações Ambientais. *Ciência do Solo*, v. 45, n. 2, p. e020015, 2021.

SILVA, R. T.; ALMEIDA, L. C. Desafios na Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil: Entre a Teoria e a Prática. *Revista Brasileira de Políticas Públicas*, v. 11, n. 4, p. 75-89, 2021.

SPERLING, Marcos Von. *Estudos de Impacto Ambiental Aplicados ao Saneamento*. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

SPERLING, Marcos Von. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*. Vol. 1. 4. ed. Belo Horizonte: DESA–UFMG, 2014.

SPERLING, Marcos Von. *Lodos Ativados – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias*. Vol. 3. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

ABNT. NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos — Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

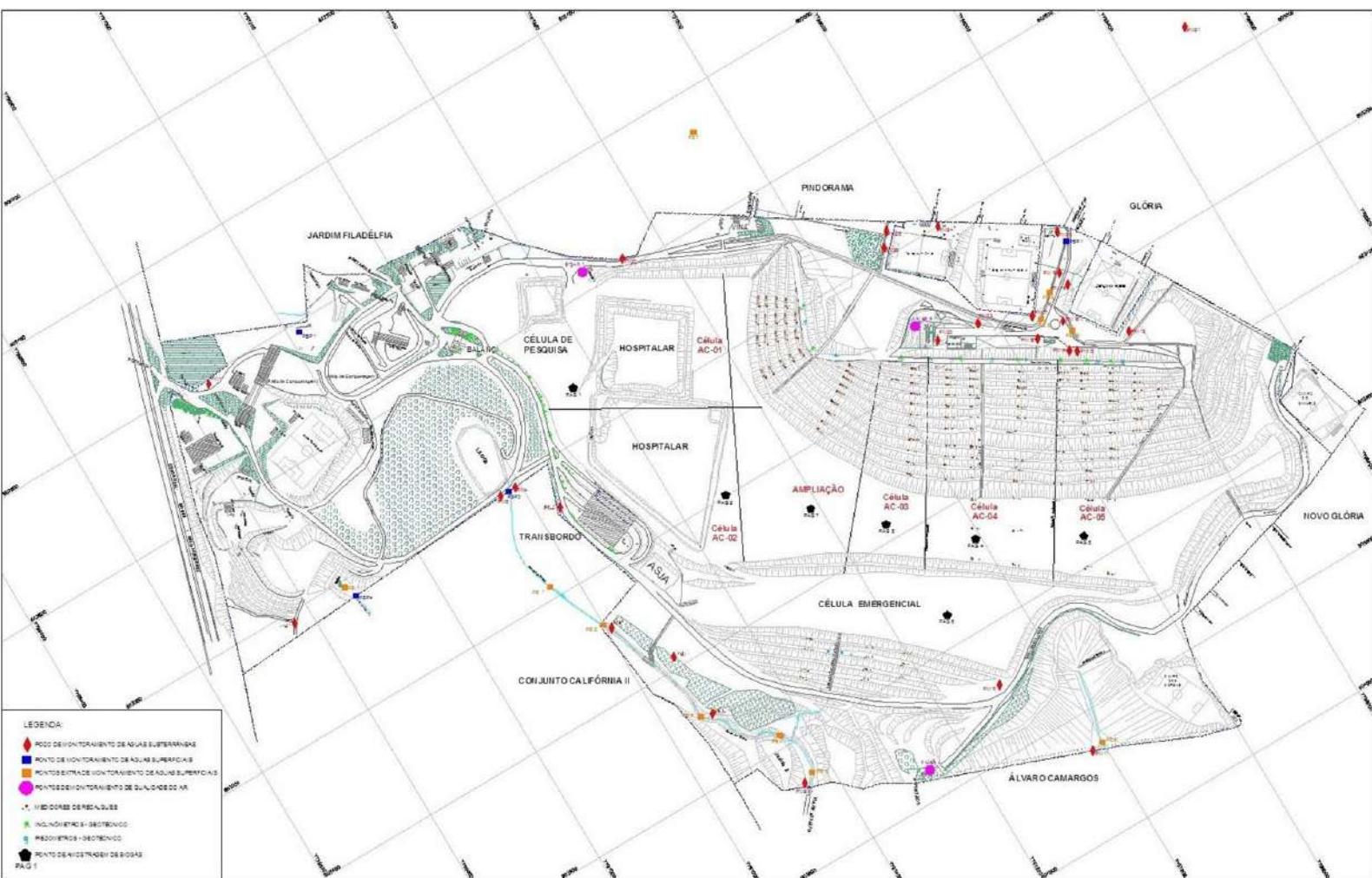
BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. São Carlos: EESC/USP, 2010.

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. et al. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

ANEXO I



ANEXO II

