



**UNIVERSIDADE
FEDERAL DO
MARANHÃO**

**CENTRO DE CIÊNCIAS DE GRAJAÚ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA EM
CIÊNCIAS NATURAIS-QUÍMICA**

ÉGILA MARIA SANTOS ASSUNÇÃO

**Parâmetros Físico-Químicos de Solos e Sedimentos como Indicadores
da Qualidade Ambiental no Rio Grajaú: Um Estudo no Perímetro Urbano
e nas Regiões de Balneários**

**GRAJAÚ-MA
2025**

ÉGILA MARIA SANTOS ASSUNÇÃO

**Parâmetros Físico-Químicos de Solos e Sedimentos como Indicadores da
Qualidade Ambiental no Rio Grajaú: Um Estudo no Perímetro Urbano e nas Regiões
de Balneários**

Monografia apresentada junto à
Coordenação do Curso de Licenciatura em
Ciências Naturais – Química da Universidade
Federal do Maranhão como um dos requisitos
para obtenção do grau de Licenciada em
Ciências Naturais/Química.

**GRAJAÚ-MA
2025**

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Assunção, Égila Maria Santos.

Parâmetros Físico-Químicos de Solos e Sedimentos como Indicadores da Qualidade Ambiental no Rio Grajaú : um Estudo no Perímetro Urbano e nas Regiões de Balneários / Égila Maria Santos Assunção. - 2025.

60 f.

Orientador(a): Antonia de Sousa Leal.

Curso de Ciências Naturais - Química, Universidade Federal do Maranhão, Grajaú, 2025.

1. Análise Ambiental. 2. Embrapa. 3. Gestão Hídrica. 4. Qualidade do Solo. 5. Rio Grajaú. I. Leal, Antonia de Sousa. II. Título.

ÉGILA MARIA SANTOS ASSUNÇÃO

**Parâmetros Físico-Químicos de Solos e Sedimentos como Indicadores da
Qualidade Ambiental no Rio Grajaú: Um Estudo no Perímetro Urbano e nas Regiões
de Balneários**

Este Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade de Monografia foi julgado adequado para obtenção do Título de Licenciada e aprovado em sua forma final pelo Curso de Licenciatura Interdisciplinar Ciências Naturais – Química.

Aprovado em: 04/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr^a. Antonia de Sousa Leal
Universidade Federal do Piauí - UFPI
Orientadora

Profa. Dr^a. Ilanna Campelo Lopes
Universidade Federal do Maranhão - UFMA
1º Membro da Banca Examinadora

Profa. Dr^a. Emily Cintia Tossi de Araújo Costa
Universidade Federal do Maranhão - UFMA
2º Membro da Banca Examinadora

Dedico este trabalho,
Aos meus pais, por me ensinar a amar a natureza.
Aos meus filhos, inspiração diária e esperança de um futuro justo.
Às mães universitárias, que lutam entre a maternidade e a ciência.
E a todas e todos que acreditam na educação ambiental como ferramenta de justiça social.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Maranhão, minha eterna gratidão por abrir suas portas e me proporcionar a oportunidade de cursar o ensino superior em uma instituição pública, gratuita e de qualidade. Agradeço ao Governo Federal, na figura do presidente Luiz Inácio Lula da Silva, pelas políticas públicas de acesso e permanência, como o REUNI e as cotas (Lei nº 12.711/2012), que foram determinantes para minha entrada na universidade.

Aos meus pais, Cícero e Socorro, agradeço profundamente pelo incentivo incondicional e pelo apoio amoroso ao longo de toda minha trajetória acadêmica. Sem a confiança e a força que me transmitiram, este momento não seria possível. Aos meus filhos, Isabella e Lourenço, dedico todo o meu esforço e amor. São eles a razão do meu compromisso em me tornar uma mãe, cidadã e profissional cada vez melhor. São o futuro do Brasil e minha maior inspiração.

Ao Ministério da Educação (MEC) e ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), agradeço o financiamento da minha bolsa através do Programa de Educação Tutorial (PET), que foi fundamental para minha permanência na universidade e para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Grupo PET Ciências Naturais, minha gratidão pelas oportunidades de vivenciar a tríade universitária — ensino, pesquisa e extensão —, que ampliaram significativamente minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Aos meus colegas de PET, Marcos Barros, Maria Aparecida Gonçalves e Moisés Moura, agradeço a parceria e companheirismo ao longo dos anos. Um agradecimento especial à minha amiga Nauane Cruz, que esteve ao meu lado em todas as etapas das análises e coletas de solo e sedimento, sendo um apoio técnico e emocional essencial. À minha amiga Dalila Sousa, também integrante do grupo, agradeço pela colaboração nas análises e pelo incentivo constante.

À professora Dra. Sandra Maria, diretora do Centro de Ciências de Grajaú, agradeço por sua dedicação e por ir além do papel de docente, sempre se fazendo presente nas nossas jornadas. À professora Dra. Nesani Félix, registro minha gratidão pelo apoio acadêmico durante o curso. À professora Dra. Priscylla Denise, cuja presença e acolhimento fizeram diferença não apenas na minha trajetória acadêmica, mas também pessoal, deixo meu sincero agradecimento.

Às colegas e amigas de curso Karina Cunha e Natália Santos, agradeço por dividirem comigo os desafios e conquistas desses cinco anos. A amizade e o apoio de

vocês foram essenciais para que esse caminho fosse mais leve.

Ao senhor Jailton, motorista da UFMA, agradeço por ter nos acompanhado com responsabilidade e gentileza durante as coletas e viagens. Às colaboradoras dos serviços gerais — Dona Irismar, Luana e Janaína —, que sempre ofereceram um sorriso e um café nos dias intensos de laboratório, minha gratidão e carinho. Agradeço também aos vigilantes, que com comprometimento abriram os portões da universidade às seis da manhã para que pudéssemos realizar nossas atividades, e aos jardineiros, que embelezam e cuidam do campus com tanto zelo, tornando a UFMA um espaço mais acolhedor.

À psicóloga Lizandra, agradeço o suporte nos dias difíceis, pelas escutas e orientações que foram fundamentais para minha permanência emocional na universidade. Às assistentes sociais Andréa e Paula, minha gratidão pela sensibilidade e orientação nos momentos em que os auxílios estudantis fizeram a diferença. À PROAES, pelas bolsas de incentivo, que contribuíram diretamente para que eu pudesse permanecer estudando com dignidade.

Aos técnicos de laboratório Afonso, Raquel e Fabrícia, meu agradecimento pelo auxílio nas análises e pelas conversas que tornaram esse processo mais leve e produtivo.

Por fim, mas com especial afeto e reconhecimento, agradeço à professora Dra. Antônia de Sousa Leal — minha orientadora, minha inspiração como mulher, mãe, profissional e educadora. Seu exemplo e apoio foram fundamentais em cada etapa deste trabalho. Se todo este TCC fosse dedicado apenas a agradecê-la, ainda seria pouco diante de tudo o que representa na minha formação.

Agradeço, ainda, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha caminhada acadêmica. Muito obrigada!

"A natureza é o corpo inorgânico do homem... ele vive da natureza, quer dizer: a natureza é o seu corpo, com o qual ele precisa manter um processo contínuo para não morrer."

(Karl Marx, Manuscritos Econômico-Filosóficos, 1844)

RESUMO

O solo e os sedimentos exercem papel essencial no equilíbrio dos ecossistemas terrestres e aquáticos, sendo indicadores da qualidade ambiental e da influência de atividades antrópicas. Este trabalho avaliou a composição físico-química de amostras de solo e sedimento coletadas em diferentes profundidades e pontos do perímetro urbano do rio Grajaú-MA, no período de 2022 a 2025. As coletas seguiram os protocolos da EMBRAPA e da CETESB e as análises laboratoriais foram realizadas com kits específicos da Alfakit, abrangendo parâmetros como pH, matéria orgânica, fósforo, nitrito, nitrato, amônia, potássio, alumínio, cálcio e magnésio. Os resultados foram comparados a valores de referência estabelecidos por órgãos como a EMBRAPA e a CETESB, bem como por estudos científicos complementares. Verificou-se variação significativa entre os anos e os pontos amostrados, com indícios de acúmulo de nutrientes, alterações nos níveis de acidez e presença de elementos químicos em concentrações acima dos valores recomendados. Essas alterações sugerem interferência direta de ações humanas como o descarte irregular de resíduos, degradação da mata ciliar e ocupação desordenada do solo. A pesquisa contribui para o diagnóstico ambiental da área urbana do rio Grajaú e reforça a importância de políticas públicas voltadas à mitigação de impactos e à recuperação ambiental.

Palavras-chave: Análise ambiental; Embrapa; gestão hídrica; qualidade do solo; rio Grajaú; qualidade de sedimento.

ABSTRACT

Soils and sediments play a vital role in maintaining ecological balance, serving as indicators of environmental quality and reflecting the impact of human activities. This study assessed the physicochemical composition of soil and sediment samples collected at different depths and locations within the urban perimeter of the Grajaú River (Maranhão, Brazil) from 2022 to 2025. Field sampling followed EMBRAPA and CETESB protocols, and laboratory analyses were performed using Alfakit chemical test kits to determine parameters such as pH, organic matter, phosphorus, nitrite, nitrate, ammonia, potassium, aluminum, calcium, and magnesium. The results were compared against reference values established by official agencies such as EMBRAPA and CETESB, as well as scientific literature where official standards were unavailable. Significant variations were observed across the years and sampling points, revealing evidence of nutrient accumulation, pH fluctuation, and chemical elements found above recommended levels. These findings suggest a strong influence from human actions such as improper waste disposal, riparian vegetation degradation, and unplanned land use. The research offers a valuable contribution to the environmental diagnosis of the Grajaú River's urban area and highlights the need for targeted public policies to mitigate environmental impacts and support ecological restoration.

Keywords: Environmental analysis; Embrapa; water management; soil quality; Grajaú River; sediment quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa dos pontos de coleta no perímetro urbano do Rio Grajaú, Grajaú-MA.....	24
Figura 2: Coleta de amostra de solo nos pontos P1, P2 e P3 sequencialmente.....	26
Figura 3: Coleta de amostra de solo nos pontos P1, P2 e P3 sequencialmente.....	26
Figura 4: Coleta de amostra de solo nos pontos P1, P2 e P3 sequencialmente.....	26
Figura 5: Coleta de sedimento no ponto P4 e P5, região de leito e meio do rio.....	26
Figura 6: Coleta de sedimento no ponto P4 e P5, região de leito e meio do rio.....	26
Figura 7: Amostras de solo e sedimento acondicionadas no laboratório e preparação das amostras para secagem.....	27
Figuras 8: Amostras de solo e sedimento acondicionadas no laboratório e preparação das amostras para secagem.....	27
Figura 9: Preparo de secagem das amostras em estufa e maceração com o pilão de plástico.....	27
Figura 10: Reagentes utilizados na extração para determinação de Alumínio, Cálcio e Magnésio, Nitrito, Nitrato e Amônia.....	28
Figura 11: Reagentes utilizados na extração para determinação de Fosfato e Potássio.....	29
Figura 12: Determinação do pH com reagente e leitura por cartela visual.....	29
Figura 13: Reagentes utilizados na determinação de matéria orgânica e cartela de cores para leitura visual dos resultados.....	30
Figura 14: Reagentes para determinação de fosfato e cartela de cores para interpretação.....	31

Figura 15: Reagentes do método Indotest para análise de amônia (N-NH_3) e cartela de cores utilizada na leitura dos resultados.....	32
Figura 16: Reagentes do método NTD para determinação de nitrito (N-NO_2^-) e cartela de cores correspondente.....	33
Figura 16: Reagentes e cartela de cores utilizados na análise de nitrato (N-NO_3^-) pelo método NTD.....	34
Figura 17: Reagentes utilizados para a determinação de Cálcio + Magnésio.....	35
Figura 18: Reagentes utilizados para análise de alumínio e viragem de coloração característica.....	35
Figura 19: Reagentes e cartela de cores utilizados para a quantificação do potássio (K^+) nas amostras.....	36
Figura 20: Reagentes e cartela de cores utilizados para a quantificação do potássio (K^+) nas amostras.....	36
Figura 21: Procedimentos laboratoriais com o EcoKit Solo no laboratório da UFMA – Grajaú.....	37
Figura 22: Procedimentos laboratoriais com o EcoKit Solo no laboratório da UFMA – Grajaú.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Variação do pH do solo (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025 por profundidade.....	39
Gráfico 2: Variação do pH dos sedimentos nos pontos P4 e P5 entre 2022 e 2025.....	40
Gráfico 3: Teor de Matéria Orgânica nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	41
Gráfico 4: Teor de Matéria Orgânica nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.....	41
Gráfico 5: Concentração de Amônia nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	43
Gráfico 6: Concentração de Amônia nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.....	43
Gráfico 7: Concentração de Nitrato nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	45
Gráfico 8: Concentração de Nitrato nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.....	45
Gráfico 9: Concentração de Nitrito nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	46
Gráfico 10: Concentração de Nitrito nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.....	47
Gráfico 11: Concentração de Fósforo nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	48
Gráfico 12: Concentração de Fósforo nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.....	49
Gráfico 13: Concentração de Potássio nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	50
Gráfico 14: Concentração de Potássio nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.....	51
Gráfico 15: Concentração de Alumínio nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	52
Gráfico 16: Concentração de Alumínio nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.....	53
Gráfico 17: Concentração de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.....	54

Gráfico 18: Concentração de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025...54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Importância da análise química de solos e sedimentos	19
2.2 Indicadores ambientais e diagnóstico da degradação	21
2.2.1 Indicadores químicos aplicados ao solo	22
2.2.2 Indicadores químicos aplicados a sedimentos	22
2.2.3 Integração e aplicação prática	23
3 OBJETIVOS.....	24
3.1 Objetivo geral	24
3.2 Objetivos específicos	24
4 METODOLOGIA	25
4.1 Área de estudo e caracterização dos pontos.....	25
4.2 Procedimentos de coleta e análise laboratorial	26
4.2.1 Procedimento de Extração Química com o Kit Alfakit.....	29
4.2.2 Parâmetros Avaliados	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Análise do pH do Solo e dos Sedimentos	39
5.1.1 pH do Solo	39
5.1.2 pH dos Sedimentos	40
5.2 Análise de Matéria Orgânica nos Solos e Sedimentos	41
5.2.1 Matéria Orgânica no Solo.....	41
5.2.2 Matéria Orgânica nos Sedimentos.....	42
5.3 Análise de Amônia nos Solos e Sedimentos	43
5.3.1 Amônia no Solo	43
5.3.2 Amônia nos Sedimentos	44
5.4 Análise de Nitrato nos Solos e Sedimentos	45
5.4.1 Nitrato no Solo	45
5.4.2 Nitrato nos Sedimentos	46
5.5 Análise de Nitrito nos Solos e Sedimentos	47
5.5.1 Nitrito no Solo	47
5.5.2 Nitrito nos Sedimentos	48
5.6 Análise de Fósforo nos Solos e Sedimentos	49
5.5.1 Fósforo no Solo	49
5.5.2 Fósforo nos Sedimentos	50

5.6 Análise de Potássio nos Solos e Sedimentos.....	51
5.6.1 Potássio no Solo.....	51
5.6.2 Potássio nos Sedimentos.....	52
5.7 Análise de Alumínio nos Solos e Sedimentos	53
5.7.1 Alumínio no Solo	53
5.7.2 Alumínio nos Sedimentos.....	54
5.8 Análise de Cálcio + Magnésio nos Solos e Sedimentos	54
5.8.1 Cálcio + Magnésio no Solo	54
5.8.2 Cálcio + Magnésio nos Sedimentos.....	55
6 CONCLUSÕES	57
7 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	58
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O município de Grajaú é um dos mais antigos do Estado do Maranhão com registro histórico de sua fundação datada de 1811, e com a publicação da Lei Provincial n.º 1225, de 7 de abril em 1881, foi elevado a cidade, com a denominação de Grajaú (Pachêco Filho, 2011, p. 107 *apud* Alves, 2024, p. 386). A cidade recebeu o mesmo nome do rio, principal corpo hídrico que atravessa o perímetro urbano, desempenhando funções socioeconômicas e ambientais essenciais, o Rio Grajaú. Além de ser fonte de abastecimento de água, o rio também é utilizado para lazer, pesca e atividades culturais, configurando-se como um elemento central na dinâmica urbana e na qualidade ambiental do município.

A bacia hidrográfica do Rio Grajaú integra a bacia do rio Mearim, apresentando características típicas de ambientes de clima tropical, com regime hidrológico influenciado por períodos de cheias e secas (ANA, 2021). Entretanto, os impactos das atividades humanas nas áreas urbanas, como lançamento de esgoto, supressão da vegetação ciliar e ocupação desordenada das margens, têm comprometido significativamente a qualidade das águas e dos sedimentos desse sistema (Silva *et al.*, 2018; Ribeiro *et al.*, 2021).

O solo é definido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária como “uma camada superficial da crosta terrestre composta por minerais, matéria orgânica, água e ar, resultante da ação de fatores como clima, organismos, relevo e tempo sobre o material de origem” (EMBRAPA, 2011). Essa interface dinâmica entre os componentes bióticos e abióticos da paisagem possui funções fundamentais para o equilíbrio ecológico, incluindo a produção de alimentos, o suporte à vegetação nativa, a regulação do ciclo hidrológico e a conservação da biodiversidade. Já os sedimentos, segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, correspondem aos “materiais sólidos de origem mineral ou orgânica que se acumulam no fundo dos corpos hídricos, podendo atuar como sumidouros ou fontes de poluentes, dependendo da qualidade ambiental da bacia hidrográfica” (CETESB, 2017).

Considerando a importância desses compartimentos ambientais, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os parâmetros físico-químicos de amostras de solo e sedimento coletadas no perímetro urbano do rio Grajaú-MA, entre os anos de 2022 e 2025. As análises foram realizadas em cinco pontos estratégicos ao longo do rio e em diferentes profundidades no solo (superficial, 15 cm e 30 cm). As coletas foram realizadas conforme protocolo da EMBRAPA (2017) e as análises químicas seguiram os

procedimentos indicados pela Alfakit (2021), utilizando kits específicos para determinação de pH, matéria orgânica, nitrito, nitrato, amônia, fósforo, potássio, alumínio, cálcio e magnésio.

O presente estudo dialoga ainda com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente os ODS 6, 11, 13 e 15. O ODS 6 – Água potável e saneamento – é contemplado ao abordar a qualidade dos corpos hídricos e dos sedimentos, fundamentais para o abastecimento e manutenção dos ecossistemas aquáticos. O ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis – é mobilizado na medida em que a pesquisa fornece subsídios para a gestão ambiental urbana e o ordenamento territorial sustentável em áreas de crescente antropização. O ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima – é abordado indiretamente, ao evidenciar os impactos da variabilidade climática sobre os parâmetros físico-químicos dos solos e sedimentos. Por fim, o ODS 15 – Vida terrestre – é atendido ao tratar da conservação dos solos, da cobertura vegetal ciliar e do equilíbrio ecossistêmico, promovendo o uso sustentável dos recursos naturais e a restauração de áreas degradadas. Assim, os dados e análises apresentados neste trabalho contribuem para ações científicas e políticas alinhadas a uma agenda ambiental global de desenvolvimento sustentável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise ambiental de solos e sedimentos é um campo fundamental para compreender os impactos de atividades antrópicas em ecossistemas terrestres e aquáticos. O solo, além de atuar como suporte para a vegetação, funciona como um sistema filtrante natural e um reservatório de nutrientes, sendo essencial para o equilíbrio ecológico (EMBRAPA, 2006). Da mesma forma, os sedimentos funcionam como indicadores da qualidade da água e do uso da terra ao longo do tempo, acumulando contaminantes que podem ser remobilizados para os corpos hídricos. Neste contexto, a análise química aplicada ao solo e ao sedimento permite a detecção de processos de degradação ambiental, ao passo que a recuperação da vegetação ciliar é um dos caminhos mais eficazes para a mitigação dos impactos e restauração da funcionalidade ecológica dos ecossistemas.

2.1 Importância da análise química de solos e sedimentos

A análise química de solos e sedimentos representa uma ferramenta central para a compreensão dos processos de degradação ambiental, especialmente em ambientes ripários urbanos, como os balneários fluviais. Esses ambientes são particularmente sensíveis a alterações na qualidade do solo e da água, frequentemente afetados por escoamento superficial, ausência de cobertura vegetal, lançamento de efluentes e atividades recreativas intensas. Compreender a composição química do solo e dos sedimentos permite não apenas o diagnóstico do estado atual, mas também a proposição de estratégias de recuperação e manejo ambiental (Vilela *et al.*, 1998).

O solo, ao interagir diretamente com a atmosfera, a biosfera e a hidrosfera, atua como mediador dos ciclos biogeoquímicos. Suas propriedades químicas determinam a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de tamponamento do pH e a retenção de contaminantes (Moreira; Siqueira, 2006). Em especial, parâmetros como pH, fósforo disponível, nitrogênio mineral (amônia, nitrito e nitrato) e matéria orgânica do solo (MOS) são amplamente utilizados em avaliações ambientais por sua relevância na fertilidade, saúde do solo e indicadores de poluição (Torres *et al.*, 2020; Richardson *et al.*, 2011).

O pH do solo é um dos fatores mais influentes sobre os processos químicos e biológicos. A acidez excessiva prejudica a disponibilidade de nutrientes como cálcio, magnésio, fósforo e molibdênio, além de aumentar a solubilidade do alumínio, que pode ser tóxico às plantas (Vilela *et al.*, 1998). Em ambientes tropicais úmidos, onde o intemperismo é acentuado, os solos tendem a ser naturalmente ácidos, sendo necessário avaliar a

necessidade de calagem para correção do pH. Segundo Prezotti e Guarçoni (2013):

A interpretação correta dos resultados da análise química do solo é fundamental para o sucesso das recomendações de calagem e adubação. Os resultados obtidos devem ser utilizados como ferramentas para diagnosticar a situação de fertilidade do solo, permitindo tomadas de decisão quanto à necessidade de correção do pH e da disponibilidade de nutrientes (Prezotti; Guarçoni, 2013, p. 11).

O fósforo é um macronutriente essencial, mas apresenta baixa mobilidade no solo e alta tendência à fixação, especialmente em solos ácidos com grande presença de óxidos de ferro e alumínio (Richardson *et al.*, 2011). Em áreas urbanas ou periurbanas, níveis elevados de fósforo em solos ou sedimentos geralmente indicam contaminação por esgotos domésticos ou escoamento de fertilizantes. Quando transportado aos corpos d'água, pode causar eutrofização e perda da qualidade ambiental.

Os compostos nitrogenados também têm papel central nos processos de avaliação da qualidade do solo e dos sedimentos. A presença de amônia, nitrito e nitrato em concentrações elevadas pode indicar degradação da matéria orgânica, contaminação por resíduos domésticos ou lixiviação excessiva em solos pobres em matéria orgânica (Sodrzeieski *et al.*, 2019). O nitrito, em particular, é instável e rapidamente convertido em nitrato ou amônia, o que o torna um excelente indicador de processos de transformação recentes.

Além disso, a matéria orgânica do solo é considerada um dos principais indicadores de sua qualidade. Ela influencia diretamente a estrutura do solo, a retenção de água e nutrientes, a atividade microbiana e o sequestro de carbono (Silva; Andrade, 2010). Em solos degradados, a matéria orgânica tende a diminuir, comprometendo sua funcionalidade ecológica. Em ambientes ripários, sua manutenção está diretamente relacionada à presença de cobertura vegetal nativa e ao grau de intervenção antrópica.

O uso de kits portáteis, como o Ecokit Solo, tem se mostrado eficaz para análise química de campo, especialmente em estudos participativos ou em locais com baixa infraestrutura laboratorial. Esses kits permitem a determinação de pH (Potencial Hidrogeniônico), fósforo, amônia, nitrato, nitrito, MOS (Matéria Orgânica do Solo) e nitrogênio mineral de forma prática e rápida, servindo tanto para diagnósticos preliminares quanto para ações educativas (ALFAKIT, 2023). A análise em tempo real facilita a tomada de decisão imediata, o que é especialmente importante em projetos de recuperação ambiental e monitoramento participativo.

Em estudo realizado em áreas de balneário urbano em Curitiba, Rossigneux *et al.* (2013) demonstraram que a análise integrada de parâmetros como pH, fósforo total e MOS pode ser usada como indicador da efetividade de ações de recuperação ambiental. Os autores observaram que áreas restauradas apresentaram melhoria gradual desses indicadores ao longo de três anos, refletindo o impacto positivo do replantio de espécies nativas e da redução da pressão antrópica.

A avaliação dos sedimentos, por sua vez, complementa o diagnóstico ambiental. Os sedimentos acumulam contaminantes ao longo do tempo, sendo considerados indicadores da memória ecológica de um ecossistema aquático (CETESB, 2019). Parâmetros como matéria orgânica (comumente em altos teores nos sedimentos de fundo), fósforo e nitrogênio mineral são úteis para identificar fontes de poluição, processos erosivos e o estado trófico dos ambientes aquáticos (Queiroz *et al.*, 2020).

Adicionalmente, a análise de solos e sedimentos em ambientes ripários urbanos auxilia no mapeamento de áreas de risco ambiental e subsidia ações de ordenamento territorial e políticas públicas. Em estudo conduzido por Queiroz *et al.*, (2020) na região Norte do Brasil, observou-se que solos como os Neossolos Quartzarênicos apresentavam maior vulnerabilidade à erosão e à perda de nutrientes, devido à sua baixa capacidade de retenção e elevado grau de lixiviação. Esses fatores reforçam a necessidade de associar análises químicas com diagnósticos físicos e morfológicos do solo.

Portanto, a análise química dos solos e sedimentos não é apenas uma prática laboratorial, mas uma ferramenta estratégica para a gestão ambiental integrada, permitindo o diálogo entre ciência, políticas públicas e comunidade. Nos contextos urbanos, como os balneários do Rio Grajaú, essa abordagem se torna ainda mais relevante por conta da fragilidade dos ecossistemas e da pressão humana intensa. O entendimento técnico das variáveis químicas é um passo essencial para reverter processos de degradação e construir alternativas sustentáveis de uso do solo.

2.2 Indicadores ambientais e diagnóstico da degradação

O diagnóstico ambiental é etapa fundamental para identificar áreas degradadas e compreender a magnitude dos impactos, suas causas e consequências. Os indicadores ambientais, especialmente os de natureza química, são ferramentas essenciais para avaliar a qualidade do solo e dos sedimentos, além de orientar medidas de mitigação e recuperação (CETESB, 2019). Em áreas de balneário urbano, como ao longo do Rio Grajaú, os processos de degradação tendem a se intensificar devido à presença de

edificações, ausência de cobertura vegetal, uso recreativo desordenado e lançamento de efluentes, tornando indispensável o uso de indicadores químicos para caracterizar esses efeitos.

2.2.1 Indicadores químicos aplicados ao solo

A escolha dos indicadores ambientais de qualidade do solo depende do objetivo do estudo e das características do ambiente. Entre os mais utilizados estão pH, matéria orgânica, fósforo disponível, compostos nitrogenados (nitrato, nitrito e amônia), capacidade de troca de cátions (CTC), condutividade elétrica e metais pesados (Vilela et al., 1998; Sodrzeieski et al., 2019). Cada parâmetro fornece informações relevantes sobre a saúde do solo, seu histórico de uso e os níveis de intervenção antrópica.

O pH é considerado um parâmetro mestre, pois influencia a solubilidade e disponibilidade de nutrientes, a mobilidade de metais tóxicos e a atividade microbiana. Solos muito ácidos ou muito alcalinos apresentam menor biodiversidade microbiana e menor eficiência na absorção de nutrientes pelas plantas (Moreira; Siqueira, 2006). Além disso, regula a adsorção de fosfato e amônio, afetando diretamente a fertilidade (Vilela et al., 1998).

A matéria orgânica do solo (MOS) está relacionada à atividade biológica, estrutura física e capacidade de retenção de água e nutrientes. Sua perda é acelerada em solos descobertos e compactados, comprometendo a ciclagem de nutrientes e favorecendo a erosão (Silva; Andrade, 2010). Em áreas urbanizadas, a redução da MOS é comum devido à remoção superficial e compactação intensa.

A presença de fósforo disponível e compostos nitrogenados (nitrato, nitrito e amônia) no solo indica possíveis fontes de contaminação, como esgotos domésticos, fertilizantes e resíduos orgânicos. Em áreas urbanas e periurbanas, concentrações elevadas de fósforo podem sinalizar desequilíbrios nos ciclos biogeoquímicos e risco de eutrofização de corpos d'água (Richardson et al., 2011).

A condutividade elétrica (CE) e a capacidade de troca de cátions (CTC) complementam o diagnóstico, refletindo salinidade e fertilidade. Solos degradados costumam apresentar baixa CTC, limitando a retenção de nutrientes e aumentando perdas por lixiviação. A análise conjunta de CTC e pH é útil para definir a necessidade de calagem e adubação (Prezotti; Guarçoni, 2013).

2.2.2 Indicadores químicos aplicados a sedimentos

Os sedimentos funcionam como repositórios de poluentes e registram o histórico

de contaminação de um ecossistema. Acumulam elementos oriundos da erosão, lixiviação de nutrientes e lançamento de efluentes, sendo sua análise essencial para compreender o grau de poluição dos cursos d'água (CETESB, 2019).

A detecção de nitrato, nitrito e amônia nos sedimentos pode indicar entrada recente de compostos nitrogenados — de origem antrópica (esgotos, fossas, lixo) — ou a decomposição de matéria orgânica em condições anaeróbias (Sodrzeieski et al., 2019). Em igarapés urbanos da Amazônia, observou-se alta concentração de fósforo total, matéria orgânica e nitrogênio mineral nos sedimentos, reflexo do aporte constante de esgotos e resíduos sólidos (Queiroz et al., 2020).

Esses parâmetros também são utilizados na composição de índices, como o Índice de Qualidade Geoquímica (IQG), que combina variáveis físico-químicas e geoquímicas para classificar o grau de degradação (Silva et al., 2017).

2.2.3 Integração e aplicação prática

A análise integrada de indicadores do solo e dos sedimentos, associada a dados espaciais, potencializa o diagnóstico ambiental. O uso de mapas pedológicos e geoespaciais, como os da Embrapa (2018), permite associar parâmetros químicos à distribuição de tipos de solo e ao uso da terra, identificando áreas mais vulneráveis à degradação. Por exemplo, os Neossolos Quartzarênicos, comuns no Nordeste, apresentam baixa fertilidade e alta susceptibilidade à erosão, demandando intervenções prioritárias.

Além dos aspectos físico-químicos, o diagnóstico deve considerar fatores sociais e institucionais, como padrões de ocupação e a eficácia da gestão ambiental (Ribeiro et al., 2021).

Ferramentas acessíveis, como o Ecokit Solo, têm ampliado o uso desses indicadores em estudos participativos e ações comunitárias, permitindo medições de pH, fósforo, nitrogênio mineral e MOS de forma rápida e interpretável (ALFAKIT, 2023).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Investigar as alterações na composição química dos solos e sedimentos ao longo do trecho de balneário do Rio Grajaú, dentro do perímetro urbano, com o objetivo de compreender como as atividades humanas têm afetado sua qualidade e avaliar a viabilidade de recuperação ambiental desses espaços.

3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são os descritos a seguir:

- Realizar análises químicas dos solos em diferentes pontos do trecho de balneário urbano, considerando parâmetros como pH, fósforo, nitrito, nitrato, amônia, nitrogênio mineral e matéria orgânica;
- Avaliar a composição dos sedimentos coletados em áreas críticas do leito do rio dentro do balneário;
- Diagnosticar os impactos causados pelas atividades antrópicas, como uso recreativo, ocupação irregular e ausência de cobertura vegetal;
- Relacionar os resultados obtidos com o estado de degradação da vegetação ciliar e os processos de erosão e assoreamento;
- Identificar indicadores de degradação e potenciais estratégias de recuperação ambiental para os solos e sedimentos analisados.

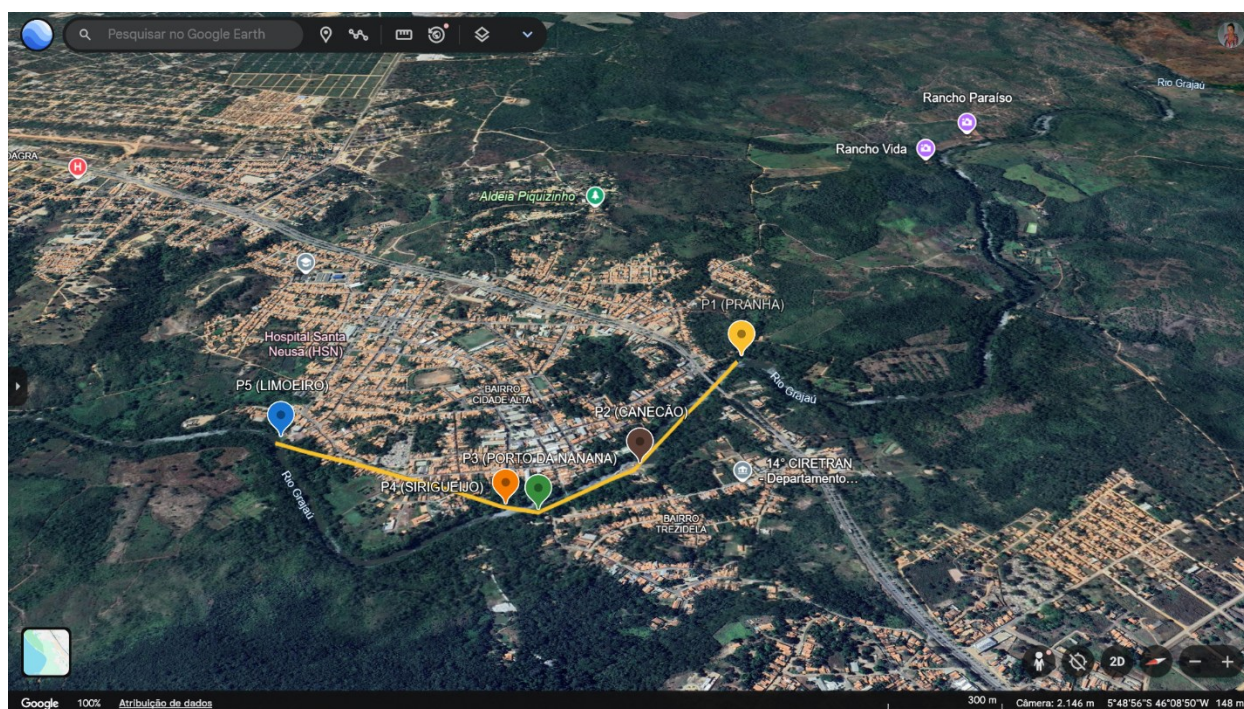
4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo e caracterização dos pontos

O presente estudo foi desenvolvido no município de Grajaú, localizado no estado do Maranhão, região Nordeste do Brasil. O município está inserido na Mesorregião Centro Maranhense e na Microrregião do Alto Mearim e Grajaú, possuindo uma população estimada de aproximadamente 70.065 habitantes, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022).

Para a realização das coletas, foram definidos cinco pontos estratégicos ao longo do perímetro urbano do Rio Grajaú, levando-se em consideração critérios como acessibilidade, representatividade ambiental, intensidade das atividades antrópicas e diversidade de usos. Os pontos foram nomeados como Prainha (P1), Canecão (P2), Porto da Nanana (P3), Sirigueijo (P4) e Limoeiro (P5), conforme apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Mapa dos pontos de coleta no perímetro urbano do Rio Grajaú, Grajaú-MA.



Fonte: Google Earth, 2025.

Cada ponto apresenta características físicas e ambientais específicas, bem como diferentes tipos de pressões antrópicas, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos pontos de coleta no perímetro urbano do Rio Grajaú – Grajaú/MA.

PONTO DE COLETA	CARACTERIZAÇÃO DO PONTO
-----------------	-------------------------

Prainha (P1)	Um dos principais balneários do município, utilizado para atividades recreativas e como ponto de captação de água pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), o que aumenta sua relevância ambiental e sanitária. Este local abriga ainda uma nascente que, embora ainda ativa, encontra-se vulnerável à pressão das atividades humanas, podendo comprometer sua integridade ecológica.
Canecão (P2)	Também possui uma nascente que, ao longo dos anos, sofreu um processo severo de degradação, sendo atualmente utilizada como canal de esgoto que deságua diretamente no rio. Além disso, uma intervenção municipal resultou no aterramento de parte da margem para a construção de uma quadra de vôlei de areia, alterando significativamente as características naturais da área.
Porto da Nanana (P3)	Neste ponto observa-se intensa circulação de pessoas, sobretudo durante os períodos de lazer, o que intensifica processos de erosão das margens, deposição de sedimentos e acúmulo de resíduos sólidos
Sirigueijo (P4)	Marcado pela presença de bares que instalam mesas e brinquedos diretamente dentro do leito do rio, impactando negativamente o sedimento e comprometendo o equilíbrio natural do ambiente aquático.
Limoeiro (P5)	No passado funcionou como um porto fluvial, hoje se configura como um espaço de uso recreativo, embora a função portuária tenha sido desativada. Apesar disso, carrega um passivo ambiental relevante devido ao despejo de um esgoto de grande volume nas imediações, o que tem contribuído de forma significativa para a degradação da qualidade da água e dos sedimentos no local.

Fonte: Elaborada pela autora, 2025.

Essa caracterização dos pontos de coleta é fundamental para contextualizar os resultados obtidos nas análises físico-químicas do solo e dos sedimentos, permitindo estabelecer correlações entre os impactos antrópicos, a qualidade ambiental e os processos de degradação presentes no Rio Grajaú.

4.2 Procedimentos de coleta e análise laboratorial

As coletas de amostras de solo e sedimento foram realizadas em cinco pontos do perímetro urbano do Rio Grajaú, no município de Grajaú (MA), conforme caracterizados na seção anterior, entre maio e julho dos anos de 2022 a 2025. O objetivo foi avaliar a influência das atividades antrópicas na qualidade ambiental, por meio da caracterização

físico-química dos materiais amostrados.

As amostras de solo foram obtidas nos pontos P1 (Prainha), P2 (Canecão) e P3 (Porto da Nanana), com o uso de cavadeira manual, seguindo o protocolo descrito no Manual da EMBRAPA (2017), conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3. Em cada ponto, foram coletadas três amostras, correspondentes às profundidades superficial (SUP), 15 cm e 30 cm, totalizando 9 amostras por campanha. Considerando as quatro campanhas anuais (2022 a 2025), foram obtidas 36 amostras de solo.

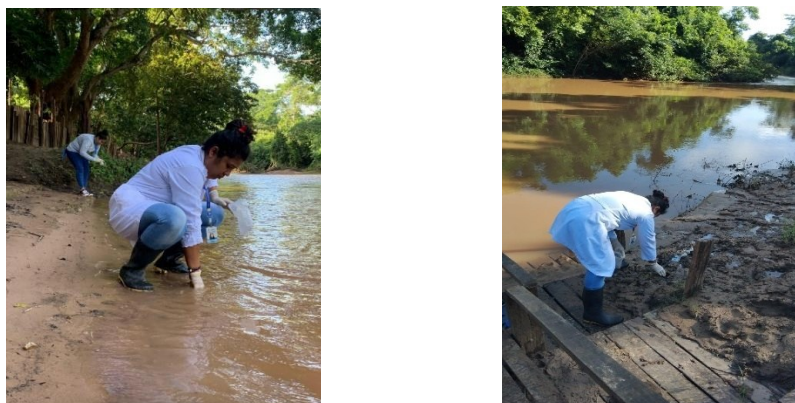
Figura 2, 3 e 4 – Coleta de amostra de solo nos pontos P1, P2 e P3 sequencialmente.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

As amostras de sedimentos foram coletadas nos pontos P4 (Sirigueijo) – em dois locais (leito e meio do rio – MDR) como observado na Figura 4. No ponto Limoeiro (P5), a coleta foi realizada apenas no leito. As coletas foram feitas diretamente com sacos plásticos, conforme orientações da CETESB (2019). As amostras foram refrigeradas até o momento da análise.

Figura 5 e 6 – Coleta de sedimento no ponto P4 e P5, região de leito e meio do rio.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

No laboratório, todas as amostras passaram por um processo padronizado de preparo, conforme os procedimentos recomendados pela ALFAKIT e pela EMBRAPA. Inicialmente, foram colocadas em placas de Petri e submetidas à secagem em estufa por 48 horas a 40 °C, a fim de evitar a perda de nutrientes voláteis. As Figuras 5 e 6 ilustram o processo de preparo.

Figuras 7 e 8 – Amostras de solo e sedimento acondicionadas no laboratório e preparação das amostras para secagem.



Fonte: Acervo da autora, 2025.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

Após a secagem, as amostras foram trituradas com pilão de plástico, homogeneizadas, e peneiradas com peneira de 2 mm. De cada amostra processada, foram separadas 40 gramas para análise. A seguir, na Figura 8 é mostrado o preparo das amostras.

Figura 9– Preparo de secagem das amostras em estufa e maceração com o pilão de plástico.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

As análises químicas foram realizadas exclusivamente com o EcoKit Solo, desenvolvido pela empresa Alfakit Equipamentos, que possibilita a triagem rápida de indicadores ambientais através de reações colorimétricas e titrimétricas. O kit é composto por reagentes específicos, cartelas de leitura visual, cubetas, provetas, seringas, papel filtro e acessórios de manipulação laboratorial.

4.2.1 Procedimento de Extração Química com o Kit Alfakit

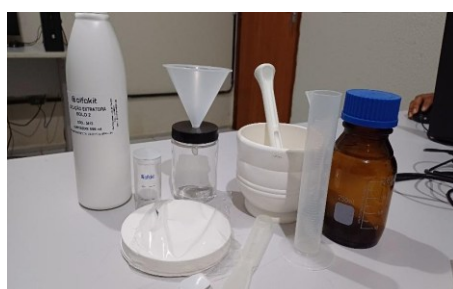
O Ecokit Solo (ALFAKIT, 2023) foi utilizado tanto para as amostras de solo quanto para as de sedimento.

4.2.1.1 Extração para Determinação de Alumínio, Cálcio e Magnésio, Nitrito, Nitrato e Amônia

1. Pesar 2,5 g de solo;
2. Adicionar 35 mL de água destilada em frasco de 150 mL;
3. Adicionar 15 mL da Solução Extratora 02;
4. Agitar por 5 minutos;
5. Deixar em repouso por 12 horas e, após decantação, filtrar o sobrenadante;
6. Utilizar o filtrado nas análises.

A seguir, a Figura 10 mostra os materiais utilizados nessa extração.

Figura 10 – Reagentes utilizados na extração para determinação de Alumínio, Cálcio e Magnésio, Nitrito, Nitrato e Amônia.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.1.2 Extração para Determinação de Fósforo e Potássio

1. Adicionar 20 mL de Solução Extratora 3 em uma cubeta;
2. Pesar 2,0 g da amostra de solo e transferir para a cubeta;
3. Agitar por 5 minutos;
4. Deixar em repouso para sedimentação;
5. Filtrar e reservar o filtrado para análise.

A Figura 11, os materiais utilizados para esta extração.

Figura 11 – Reagentes utilizados na extração para determinação de Fosfato e Potássio.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2 Parâmetros Avaliados

Os parâmetros químicos avaliados foram: pH, fosfato (PO_4), potássio (K^+), alumínio (Al^{3+}), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-), amônia (NH_3) e matéria orgânica (% MO).

Cada um desses parâmetros foi analisado conforme instruções padronizadas do fabricante, descritas a seguir:

4.2.2.1 Determinação de pH

1. Mistura de 10 g de solo com 10 mL de água destilada;
2. Agitação e repouso por 30 minutos;
3. Coleta do sobrenadante para análise com reagente indicador;
4. Leitura feita por comparação com escala de cor.

A seguir na Figura 12, mostra-se o reagente de pH e a cartela de visualização.

Figura 12 – Determinação do pH com reagente e leitura por cartela visual.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.2 Determinação de Matéria Orgânica do Solo (MOS)

1. Medir 8 mL de água destilada com seringa plástica de 10 mL e transferir para

uma cubeta de vidro com tampa de teflon.

2. Adicionar 2 mL do Reagente de Cor utilizando uma seringa com ponteira de 3 mL.
3. Pesar 1 g da amostra de solo em balança analítica.
4. Transferir completamente a amostra para a cubeta contendo a mistura de reagente e água.
5. Fechar a cubeta e agitar vigorosamente por 2 minutos.
6. Deixar em repouso por 2 minutos para permitir a sedimentação.
7. Comparar visualmente a coloração da fase líquida com a cartela de cores fornecida no kit.

Observação: Caso o resultado obtido seja superior a 9,0%, repetir a análise utilizando apenas 0,5 g de amostra e multiplicar o resultado por 2.

A seguir, apresenta-se a Figura 13 com os reagentes específicos utilizados na análise de matéria orgânica, juntamente com a cartela de cores que possibilita a leitura visual do resultado. Esses materiais são fundamentais para a correta execução do teste, garantindo a precisão na estimativa do teor de matéria orgânica presente nas amostras analisadas.

Figura 13 – Reagente utilizado na determinação de matéria orgânica e cartela de cores para leitura visual dos resultados.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.3 Determinação de Fosfato (PO_4^{3-})

1. Transferir o filtrado até a marca da cubeta pequena (5 mL);
2. Adicionar 5 gotas do Reagente 01, fechar e agitar;
3. Adicionar 1 medida do Reagente 02, fechar e agitar novamente;
4. Aguardar 10 minutos de reação;
5. Abrir a cubeta, posicioná-la sobre a cartela de cores e realizar a comparação visual da coloração obtida.

Conversões dos Resultados:

Os resultados obtidos serão expressos em fósforo (P), na unidade mg L^{-1} . Para isso, o valor lido na cartela é multiplicado por 0,3263, fator de conversão adotado pelo método ALFAKIT. Esse fator decorre da relação entre a massa molar do fósforo elementar ($30,97 \text{ g mol}^{-1}$) e a do íon fosfato (PO_4^{3-} , $94,97 \text{ g mol}^{-1}$), de forma que a leitura colorimétrica, originalmente em mg L^{-1} de PO_4^{3-} , é convertida para o equivalente em mg L^{-1} de P.

Caso se deseje expressar o valor em P_2O_5 , deve-se multiplicar o resultado por 1,494. Na sequência, apresenta-se a Figura 14 com os reagentes utilizados para a determinação de fosfato (PO_4^{3-}), juntamente com a cartela de cores de referência, que permite a leitura visual e conversão dos dados em P (fósforo).

Figura 14 – Reagentes para determinação de fosfato e cartela de cores para interpretação dos resultados.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.4 Determinação de Amônia (NH_3) – Método Indotest

1. Transferir o filtrado até a marca de 5 mL na cubeta pequena;
2. Adicionar 3 gotas do Reagente 01 e agitar suavemente;
3. Em seguida, adicionar 3 gotas do Reagente 02 e agitar;
4. Adicionar 3 gotas do Reagente 03 e realizar nova agitação;
5. Após reação, abrir a cubeta, posicioná-la sobre a cartela de cores e realizar a comparação visual com a escala cromática.

Conversão dos Resultados:

Os resultados obtidos foram expressos em mg/kg de NH_3 (amônia) e, para isso, multiplicou-se o valor lido na cartela por 2, que corresponde ao fator de conversão necessário para adequar a concentração medida pela cartela à concentração real na amostra, levando em consideração o volume da amostra analisada, o procedimento de diluição aplicado durante a análise e a relação entre as unidades fornecidas pelo método e as unidades finais desejadas em mg/kg .

Observações Importantes:

Se a cor obtida ultrapassar o limite da escala da cartela, deve-se repetir a análise usando 2,5 mL da amostra + 2,5 mL de água destilada, mantendo o procedimento de adição de reagentes. Neste caso, o resultado também deve ser multiplicado por 2.

A seguir, apresenta-se a Figura 15 com os reagentes específicos utilizados no teste de amônia, bem como a cartela cromática padrão para interpretação dos resultados.

Figura 15 – Reagentes do método Indotest para análise de amônia (NH_3) e cartela de cores utilizada na leitura dos resultados.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.5 Determinação de Nitrito (N-NO_2^-) – Método NTD

1. Transferir o filtrado até a marca de 5 mL da cubeta pequena;
2. Adicionar 1 medida do Reagente 1 e agitar vigorosamente por aproximadamente 2 minutos;
3. Em seguida, adicionar 1 medida do Reagente 2 e agitar até sua completa dissolução;
4. Adicionar 2 gotas do Reagente 3 e agitar suavemente;
5. Aguardar 15 minutos de reação para o desenvolvimento da coloração;
6. Posicionar a cubeta sobre a cartela cromática fornecida pelo kit e realizar a comparação visual da cor.

Conversão dos Resultados:

O resultado visual obtido na cartela deve ser multiplicado por 2 para expressar a concentração em mg/L de nitrito na forma de N-NO_2^- (nitrito como nitrogênio). Para converter esse valor para a forma do íon nitrito (NO_2^-), utiliza-se o fator de multiplicação 3,280, que corresponde à relação entre a massa molar do íon nitrito ($\text{NO}_2^- = 46,01 \text{ g/mol}$) e a massa molar do nitrogênio no nitrito ($\text{N} = 14,00 \text{ g/mol}$). Essa conversão permite expressar a concentração considerando a totalidade do composto químico presente.

Observações Importantes:

O tempo de reação de 15 minutos é essencial para garantir a estabilidade da cor antes da leitura.

Na Figura 16, apresentam-se os reagentes utilizados na análise de nitrito e a cartela de cores que permite a comparação visual para quantificação do parâmetro.

Figura 16 – Reagentes do método NTD para determinação de nitrito (N-NO_2^-) e cartela de cores correspondente.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.6 Determinação de Nitrato (N-NO_3^-) – Método NTD

1. Transferir o filtrado até a marca de 5 mL da cubeta pequena;
2. Adicionar 1 medida do Reagente 1 e agitar vigorosamente por 2 minutos;
3. Adicionar 1 medida do Reagente 2 e agitar até sua completa dissolução;
4. Adicionar 2 gotas do Reagente 3 e agitar suavemente;
5. Aguardar 15 minutos para o desenvolvimento da cor;
6. Posicionar a cubeta sobre a cartela cromática fornecida e realizar a comparação visual da coloração.

Conversão dos Resultados:

O valor visual observado deve ser multiplicado por 2, expressando o resultado em mg/L de N-NO_3^- (nitrato).

Observações Importantes:

O tempo de repouso é essencial para garantir a leitura correta da coloração.

Na Figura 15, encontram-se os reagentes específicos utilizados para a análise de nitrato e a cartela de cores utilizada para a determinação visual do parâmetro.

Figura 15 – Reagentes e cartela de cores utilizados na análise de nitrato (N-NO_3^-) pelo método NTD.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.7 Determinação de Cálcio + Magnésio ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)

1. Transferir 4 mL do sobrenadante para a cubeta grande e completar até 10 mL com água destilada;
2. Adicionar 16 gotas do Inibidor de Interferentes Solo e agitar suavemente em movimentos circulares;
3. Adicionar 4 gotas do reagente Dureza 1 e agitar;
4. Adicionar 1 medida do reagente Dureza 2 com a pá número 1 e agitar até homogeneizar;
5. Preencher a seringa plástica com a Solução titulante para Cálcio + Magnésio e ajustar o êmbolo no zero da escala;
6. Gotejar lentamente a solução na cubeta, agitando a cada gota, até ocorrer a mudança de coloração de vinho/rosa para azul puro;
7. Registrar o volume consumido na seringa ao final da reação.

Cálculo do Resultado:

O volume registrado na seringa corresponde diretamente à concentração de Cálcio + Magnésio, expressa em cmolc/kg , onde o “c” indica a quantidade de carga positiva (carga equivalente) dos íons, ou seja, concentra-se na capacidade de troca de cátions por quilograma de solo.

A seguir, a Figura 17 apresenta os reagentes utilizados para a determinação de Cálcio + Magnésio.

Figura 17 – Reagentes utilizados na análise de determinação de Cálcio + Magnésio.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.8 Determinação de Alumínio (Al^{3+})

1. Transferir o sobrenadante filtrado para a cubeta grande, completando até a marca de 10 mL;
2. Adicionar 3 gotas do reagente Alumínio Solo 1 e agitar suavemente em movimentos circulares;
3. Preencher a seringa plástica com o reagente titulante Alumínio Solo 2, ajustando o êmbolo no zero da escala;
4. Gotejar lentamente a solução titulante na cubeta, agitando a cada gota, até observar a mudança de coloração para azul;
5. Registrar o volume total de titulante utilizado.

Cálculo do Resultado:

A leitura da seringa indica diretamente o teor de alumínio trocável (Al^{3+}) no solo ou sedimento, expresso em cmolc/kg, onde o alumínio trocável refere-se à quantidade de íons Al^{3+} disponíveis na fração de troca iônica do solo, que podem ser facilmente trocados com outros cátions presentes no ambiente, influenciando a acidez e a disponibilidade de nutrientes.

Na Figura 18, observa-se os reagentes utilizados nesta determinação.

Figura 18 – Reagentes utilizados para análise de alumínio e viragem de coloração característica.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

4.2.2.9 Determinação de Potássio (K^+)

1. Medir 1 mL do filtrado utilizando seringa plástica e transferir para uma cubeta pequena;
2. Adicionar 3 gotas do Reagente 1 e agitar;
3. Em seguida, adicionar 4 gotas do Reagente 2 e agitar vigorosamente por 2 minutos;
4. Repetir a adição de 20 gotas do Reagente 1 e agitar novamente;
5. Acrescentar 3,6 mL de água destilada à cubeta;
6. Agitar continuamente por 5 minutos, invertendo a cubeta com cuidado para evitar formação de bolhas;
7. Realizar a leitura visual na cartela colorimétrica, posicionando a cubeta sobre fundo preto até obter correspondência exata de cor.

Cálculo do Resultado:

O valor observado na cartela deve ser multiplicado por 0,025, e o resultado será expresso em cmolc/kg, correspondendo à concentração de potássio trocável.

Nas Figuras 18 e 19 a seguir, apresentam-se os reagentes utilizados para a análise de potássio e a cartela de cores aplicada na interpretação dos resultados.

Figuras 19 e 20 – Reagentes e cartela de cores utilizados para a quantificação do potássio (K^+) nas amostras.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

Todos os procedimentos foram executados conforme o manual técnico da Alfakit (2023), observando-se rigorosamente os tempos de reação, volumes de reagentes e condições de leitura recomendados. As análises foram realizadas em triplicata, com registros padronizados inicialmente efetuados no caderno de laboratório e posteriormente transcritos para planilhas eletrônicas no Excel, visando à adequada organização e tratamento dos dados.

Os dados coletados entre 2022 e 2025 integram o monitoramento do estudo, que

confronta os parâmetros químicos do solo e dos sedimentos com valores de referência da EMBRAPA (solo) e da CETESB (sedimentos). Para parâmetros sem referência CETESB, como alumínio e soma de cálcio e magnésio em sedimentos, adotaram-se limites da literatura científica, conforme Abessa et al. (2008) e Minella et al. (2007), respectivamente. Tais referências embasam a análise da degradação, fertilidade e contaminação ambiental da área em estudo.

Os resultados serão apresentados por parâmetro, comparando-se os cinco pontos amostrados (P1 a P5), evidenciando as diferenças entre solos e sedimentos e as influências antrópicas locais. Ausências de coleta em P4 nos anos de 2023 e 2025 serão assinaladas nos gráficos por pontos azuis.

As análises laboratoriais foram feitas no Laboratório de Biologia e Química Universidade Federal do Maranhão – Centro de Ciências de Grajaú, conforme mostra as Figuras 21 e 22.

Figuras 21 e 22 – Procedimentos laboratoriais com o EcoKit Solo no laboratório da UFMA – Grajaú.



Fonte: Acervo da autora, 2025.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

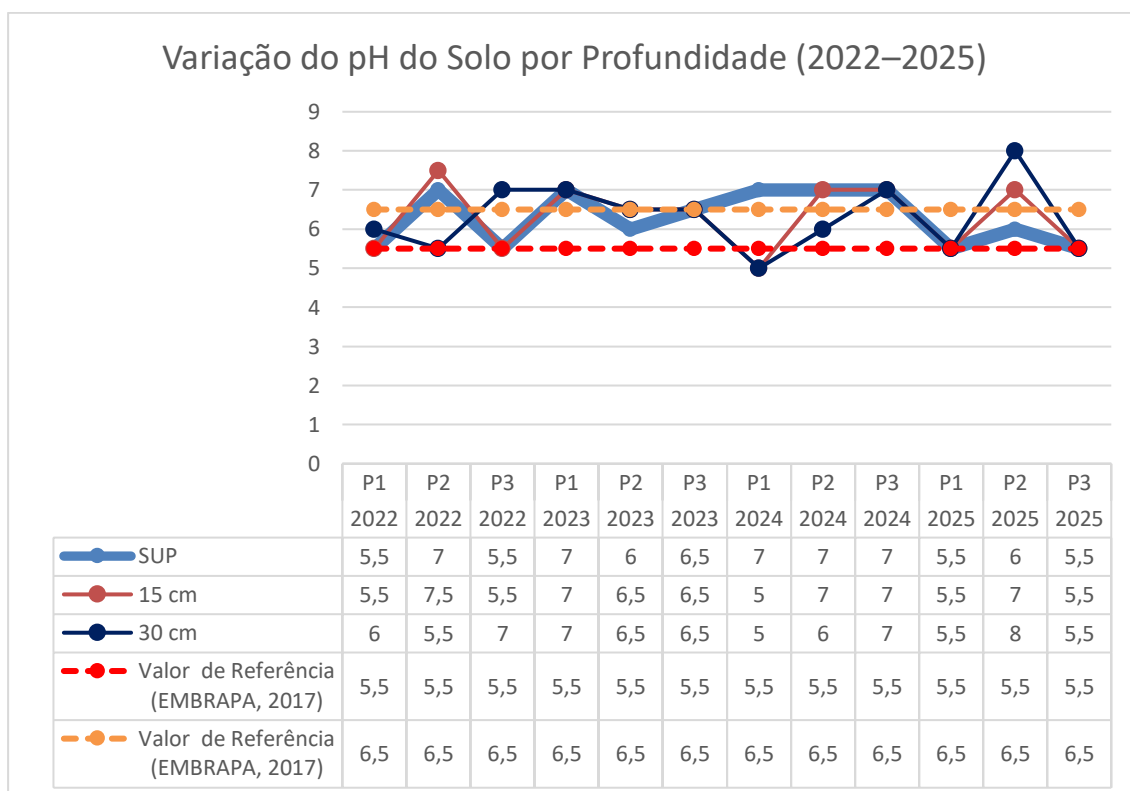
5.1 Análise do pH do Solo e dos Sedimentos

O pH é um indicador chave da qualidade de solos e sedimentos, influenciando a disponibilidade de nutrientes, metais pesados e atividade biológica. Solos tropicais são ideais com pH entre 5,5 e 6,5 (EMBRAPA, 2017), enquanto sedimentos naturais fluviais devem ter pH entre 6,0 e 8,0 (CETESB, 2021). Valores fora dessas faixas podem indicar degradação ambiental, afetar a fauna aquática e sinalizar poluição.

5.1.1 pH do Solo

As análises de pH do solo foram realizadas nos pontos P1, P2 e P3, em três profundidades distintas (superficial, 15 cm e 30 cm), no período de 2022 a 2025. Os resultados estão dispostos no Gráfico 1, que apresenta a variação anual do pH em cada ponto e profundidade.

Gráfico 1 – Variação do pH do solo (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025 por profundidade.



Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2017).

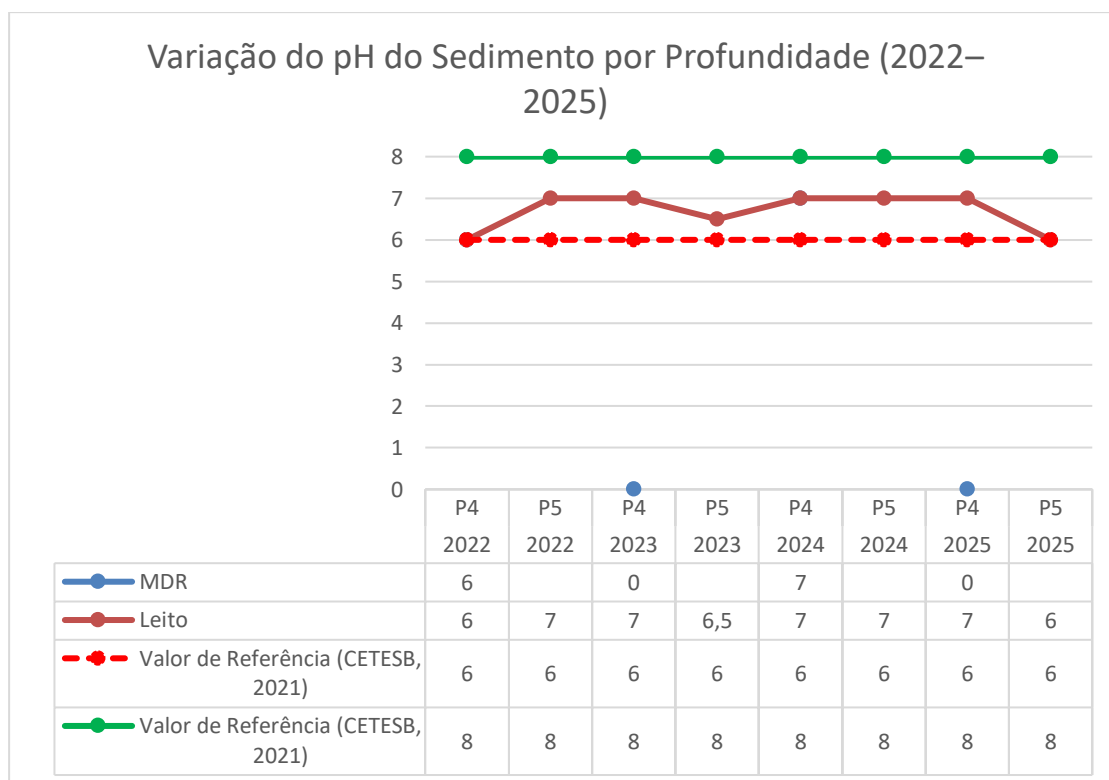
Entre 2022 e 2025, o pH do solo variou devido a fatores urbanos, como a deposição de poluentes e o manejo inadequado do solo; fatores climáticos, incluindo variações na precipitação e temperatura que afetam os processos de lixiviação e mineralização; e o uso do solo, como a aplicação de fertilizantes, compactação e remoção da cobertura vegetal.

Em 2022, o pH do solo variou entre 5,5 e 7,5. A alcalinização observada em P2 pode estar associada à presença de aterros e concreto na área, materiais conhecidos por liberar compostos alcalinos, como hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), durante sua cura ou decomposição. Estudos indicam que resíduos de construção e demolição, como concreto e cal, podem atuar como corretivos de acidez do solo, elevando seu pH quando aplicados em doses adequadas (Infoteca-e, 2020). Em 2023, o pH ficou mais estável (6,0 a 7,0). Em 2024, P1 sofreu acidificação (pH 5,0) por lixiviação. Em 2025, o pH variou de 5,5 a 8,0, com contaminação alcalina em P2 (30 cm). Essas flutuações destacam a importância do monitoramento e manejo para preservar nutrientes, evitar toxicidade de alumínio e manter a saúde do solo.

5.1.2 pH dos Sedimentos

As análises de pH dos sedimentos foram conduzidas nos pontos P4 (Meio do Rio – MDR) e P5 (Leito do Rio), localizados em trechos do rio Grajaú marcados por intensa interação antrópica, como áreas de balneários, bares e proximidade com zonas de despejo de resíduos sólidos e líquidos. Os dados coletados entre 2022 e 2025 estão sistematizados no Gráfico 2, permitindo uma visualização clara da variação do pH ao longo do tempo.

Gráfico 2 – Variação do pH dos sedimentos nos pontos P4 e P5 entre 2022 e 2025.



Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); CETESB (2021).

No ponto P4, o pH variou entre 6,0 e 7,0 dentro dos limites recomendados, mas as coletas de 2023 e 2025 não foram realizadas devido às condições climáticas. A estabilidade pode estar ligada à movimentação da água, embora as estruturas fixas presentes na área — como construções permanentes, muros de contenção e aterros — possam não representar riscos imediatos, elas podem constituir fontes potenciais de problemas futuros. Esses riscos incluem o comprometimento da estabilidade do solo devido à alteração do escoamento superficial, o aumento da impermeabilização do solo que favorece o acúmulo de água e o risco de deslizamentos, além da possibilidade de degradação ambiental causada pela falta de manutenção ou envelhecimento das estruturas. Portanto, é fundamental monitorar essas estruturas para prevenir impactos ambientais e garantir a segurança da população local. Em P5, o pH oscilou entre 6,0 e 7,0, indicando influência de resíduos domésticos e matéria orgânica. Manter o pH natural é vital para o equilíbrio ecológico, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e ações de proteção do Rio Grajaú.

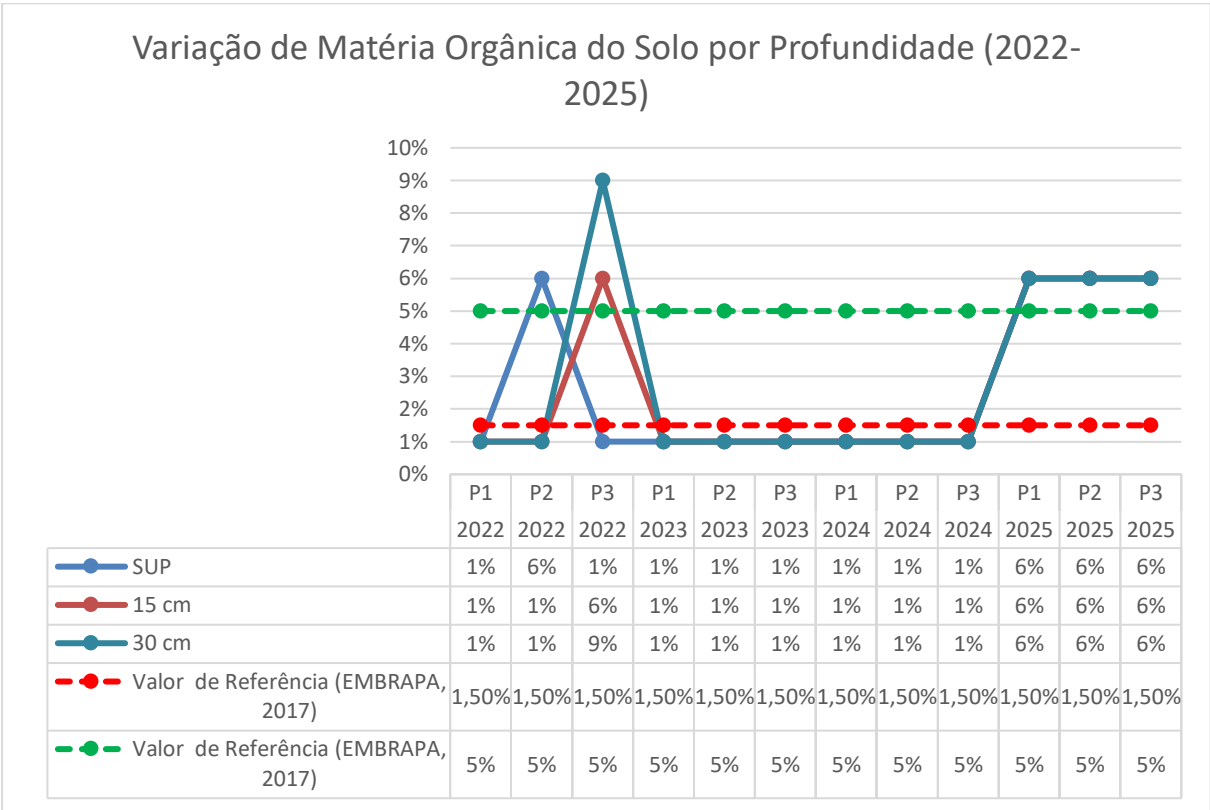
5.2 Análise de Matéria Orgânica nos Solos e Sedimentos

A matéria orgânica é fundamental para a fertilidade do solo e a qualidade dos ecossistemas aquáticos, influenciando a estrutura do solo, retenção de água, nutrientes e equilíbrio microbiológico. Em ambientes aquáticos, afeta a biodisponibilidade de metais pesados ao alterar seu estado químico e mobilidade, e influencia o consumo de oxigênio por meio da decomposição da matéria orgânica, que pode reduzir os níveis de oxigênio dissolvido, comprometendo a vida aquática. No estudo, a matéria orgânica foi avaliada entre 2022 e 2025 nos pontos P1, P2 e P3 (solo) e P4 e P5 (sedimentos).

5.2.1 Matéria Orgânica no Solo

Nos solos dos pontos P1, P2 e P3, observou-se no Gráfico 3 uma concentração de matéria orgânica inferior ao ideal em grande parte dos anos analisados. Os dados revelam que apenas em 2025 houve uma elevação significativa dos teores, com valores entre 6% a 9%, superando o intervalo considerado ideal para solos tropicais (1,5% a 5%). Tal elevação pode estar associada à intensificação da deposição de resíduos orgânicos ou à menor decomposição da biomassa vegetal em decorrência de alterações microclimáticas.

Gráfico 3 – Teor de Matéria Orgânica nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025

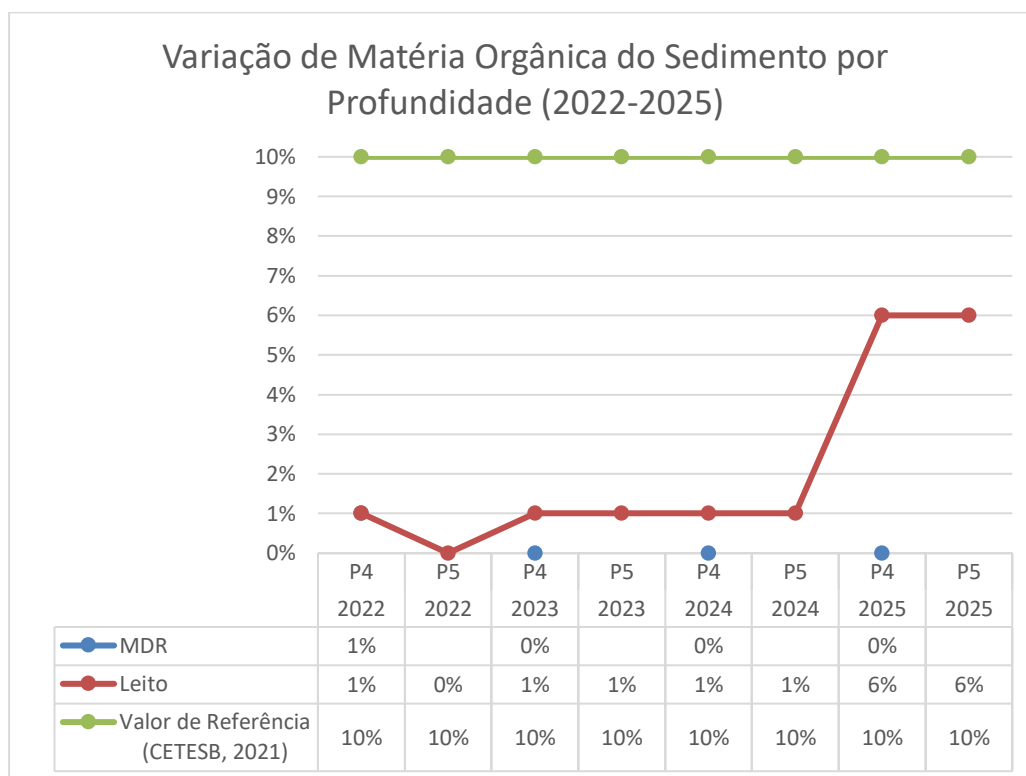


Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2017).

Entre 2022 e 2024, os níveis de matéria orgânica ficaram baixos (1% a 3%), indicando baixa retenção de nutrientes e água, além de possível fragilidade do solo. Valores mais altos e pontuais, como 6% a 9% no P3 em 2022, podem refletir fontes locais, como resíduos domésticos ou matéria vegetal acumulada. Esses dados são avaliados com base nos parâmetros ideais da EMBRAPA (2011), que recomendam 1,5% a 5% para solos tropicais.

5.2.2 Matéria Orgânica nos Sedimentos

De acordo com o Gráfico 4, nos pontos de sedimentos (P4 e P5), os teores de matéria orgânica permaneceram dentro dos limites considerados naturais para ambientes aquáticos ($\leq 10\%$), conforme parâmetros estabelecidos pela CETESB (2021). Os valores variaram entre 0% e 6%, com destaque para o aumento em 2025 no ponto P4 (6%), o que pode estar associado a escoamento superficial, deposição de matéria orgânica proveniente da vegetação marginal e lançamento de resíduos sólidos.

Gráfico 4 – Teor de Matéria Orgânica nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.

Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); CETESB (2021).

A matéria orgânica nos sedimentos é vital como base alimentar para organismos bentônicos, mas seu excesso pode causar eutrofização, aumentar a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e liberar compostos tóxicos. Por isso, o monitoramento contínuo da matéria orgânica em solos e sedimentos é essencial para o manejo das margens do Rio Grajaú e para ações de controle de resíduos e restauração das matas ciliares.

5.3 Análise de Amônia nos Solos e Sedimentos

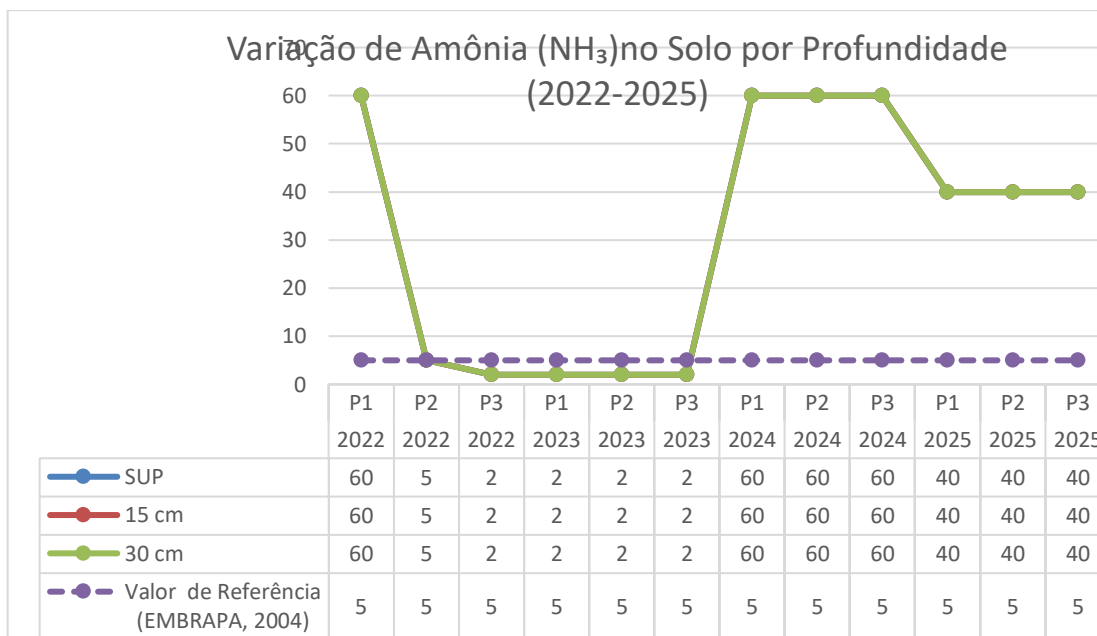
A amônia é um indicador importante da qualidade ambiental, ligada à decomposição de matéria orgânica, uso de fertilizantes e esgotos domésticos. Altas concentrações podem ser tóxicas para organismos aquáticos e prejudicar a fertilidade do solo. O estudo analisou amônia em solos (P1, P2, P3) e sedimentos (P4, P5) entre 2022 e 2025, comparando os valores aos limites da EMBRAPA (5 mg/kg para solos) e CETESB (3,7 mg/kg para sedimentos).

5.3.1 Amônia no Solo

No solo, o ponto P1 apresentou altas concentrações de amônia (60 mg/kg em 2022 e 2024; 40 mg/kg em 2025), muito acima do limite de 5 mg/kg da EMBRAPA, indicando acúmulo de compostos nitrogenados possivelmente provenientes de resíduos orgânicos e

fertilizantes, o que é corroborado pelos elevados níveis de nitrito e nitrato observados nas análises, sugerindo processos ativos de nitrificação e decomposição orgânica no ambiente. Já P2 e P3 tiveram níveis baixos entre 2022 e 2023, mas aumentaram significativamente em 2024 e 2025, alcançando 40 a 60 mg/kg, indicando piora ambiental nesses locais.

Gráfico 5 – Concentração de Amônia nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.

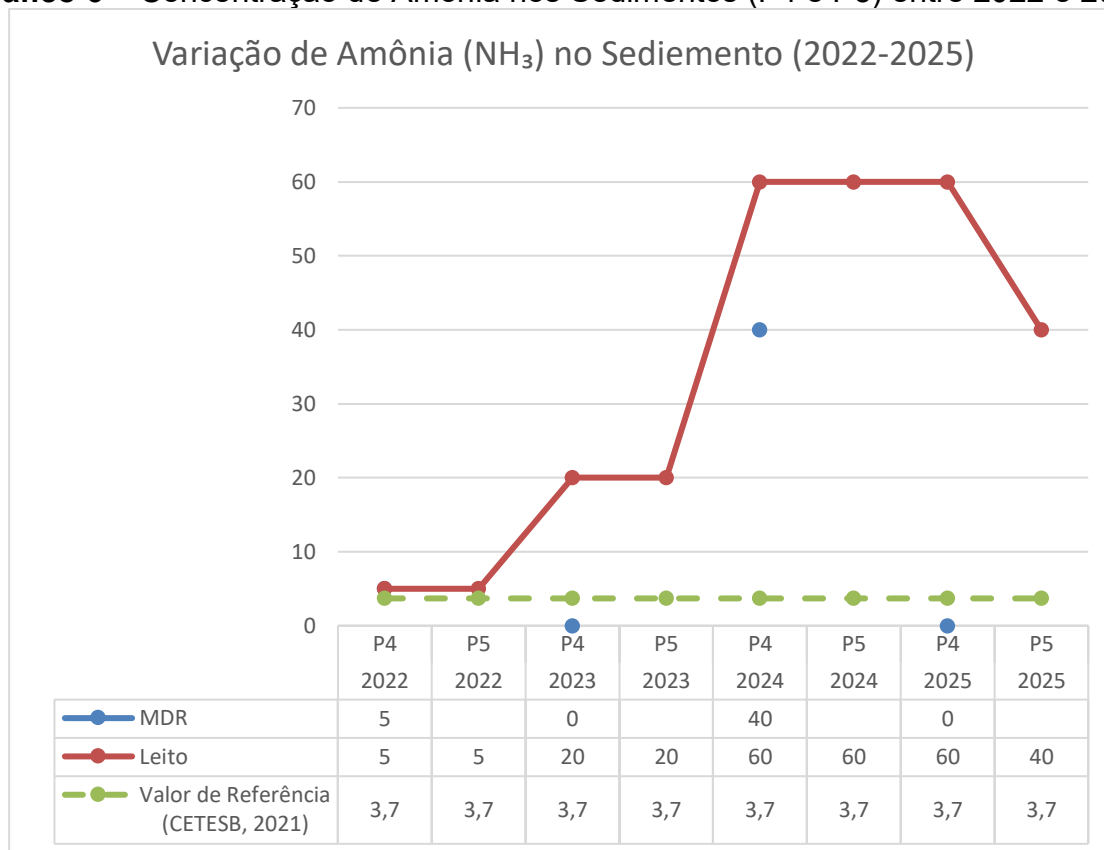


Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2004).

Concentrações tão elevadas de amônia nos solos podem comprometer a qualidade microbiológica e química do solo, inibindo processos naturais como a fixação biológica de nitrogênio e favorecendo a lixiviação para corpos hídricos adjacentes. O controle de fontes de contaminação e a recuperação da vegetação ciliar são estratégias importantes para mitigar esses impactos.

5.3.2 Amônia nos Sedimentos

Nos sedimentos, os valores de amônia variaram consideravelmente entre os anos (Gráfico 6). Em 2022, os pontos P4 e P5 registraram valores de 5 mg/kg, acima do valor de referência da CETESB (3,7 mg/kg). Em 2023, observou-se um aumento acentuado, com o ponto P5 atingindo 20 mg/kg. O mesmo valor foi mantido em 2024 e 2025, sobretudo no ponto P4, com máximos de 60 mg/kg. Esses dados indicam acúmulo contínuo de compostos nitrogenados nos sedimentos, provavelmente devido ao lançamento de efluentes, restos alimentares e detritos urbanos.

Gráfico 6 – Concentração de Amônia nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.

Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025).

Devido a condições climáticas adversas, não foi possível coletar amostras no ponto P4 em 2023 e 2025, limitando a análise nesse local. O excesso de amônia nos sedimentos, observado em 2023, 2024 e 2025, prejudica a qualidade da água, favorece a eutrofização e pode ser tóxico para a fauna bentônica. Esses resultados destacam a importância de políticas públicas para saneamento, educação ambiental e monitoramento contínuo das áreas ribeirinhas..

5.4 Análise de Nitrato nos Solos e Sedimentos

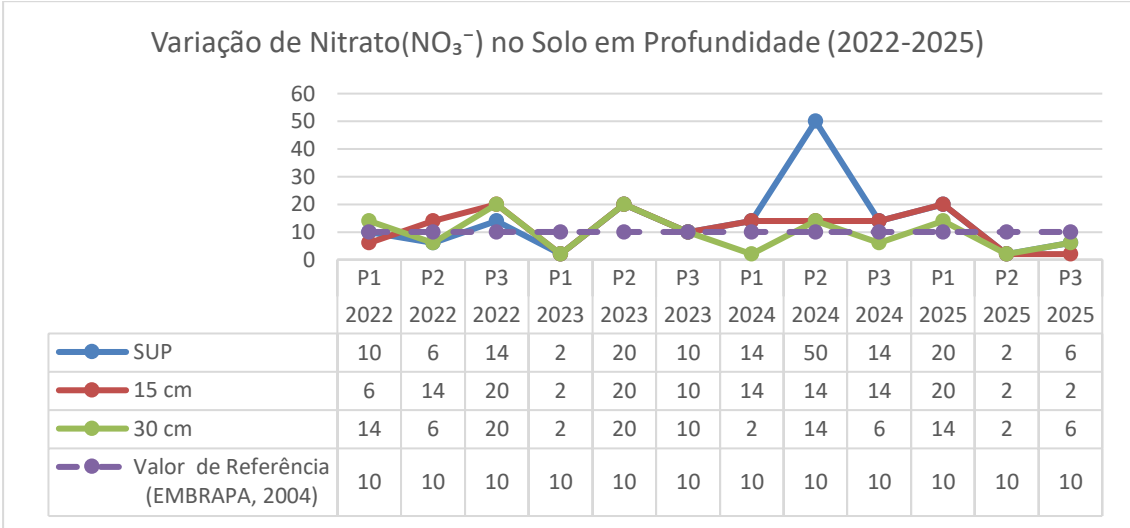
O nitrato (NO₃⁻) é uma forma essencial de nitrogênio para as plantas, mas concentrações elevadas no solo e sedimentos indicam possível contaminação por fertilizantes, esgotos ou matéria orgânica. Quando lixiviado, pode causar eutrofização em corpos d'água. Entre 2022 e 2025, foram analisados os níveis de nitrato nos pontos de solo (P1, P2, P3) e sedimento (P4, P5), comparando-os aos limites de 10 mg/kg estabelecidos pela EMBRAPA e CETESB.

5.4.1 Nitrato no Solo

Em 2022, os pontos P1, P2 e P3 apresentaram variações significativas nos teores

de nitrato entre as camadas (Gráfico 7). P1 e P3 revelaram valores acima do limite de referência, atingindo até 14 e 20 mg/kg, respectivamente. Em 2023, houve uma redução expressiva dos teores nos três pontos (2 mg/kg), indicando possível mobilização do nitrato pelas chuvas e posterior lixiviação.

Gráfico 7 – Concentração de Nitrato nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.

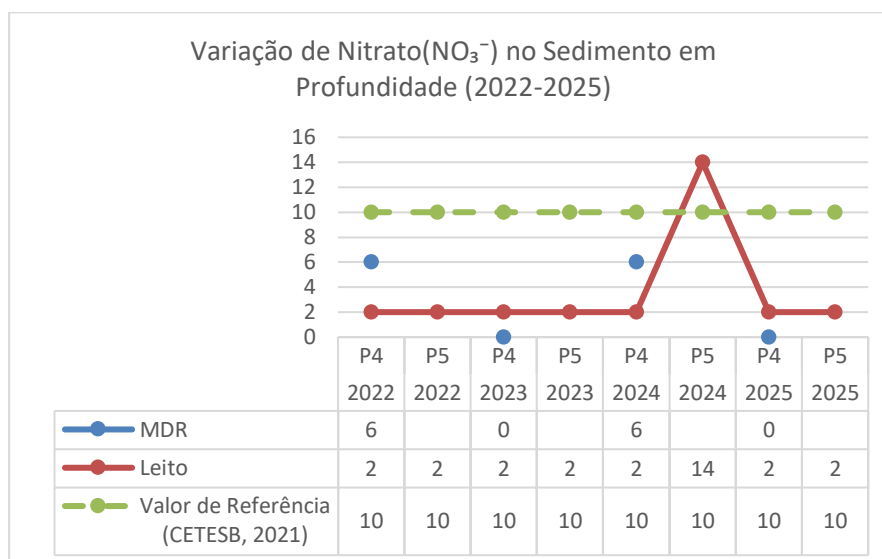


Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2004).

Em 2024, houve aumento acentuado nos níveis de nitrato, especialmente no ponto P2 (50 mg/kg), indicando forte contaminação possivelmente ligada a atividades urbanas e ausência de mata ciliar. Em 2025, P1 manteve níveis elevados (20 mg/kg), enquanto P2 e P3 apresentaram redução, sugerindo influência de variações sazonais ou medidas mitigadoras parciais.

5.4.2 Nitrato nos Sedimentos

Nos sedimentos, os dados do Gráfico 8 revelaram estabilidade nos anos de 2022, 2023 e 2025 nos dois pontos, com valores de 2 mg/kg — bem abaixo do limite de referência da CETESB (2021) 10 mg/kg. Porém, no ano de 2024, o ponto P5 apresentou um pico de 14 mg/kg, ultrapassando o limite permitido, o que pode indicar despejos esporádicos de efluentes ou elevada carga orgânica lançada no rio durante o período chuvoso.

Gráfico 8 – Concentração de Nitrato nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.

Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); CETESB (2021).

Devido a condições climáticas adversas, não foi possível coletar amostras no ponto P4 em 2023 e 2025, limitando a análise. Manter o nitrato dentro dos limites é crucial para proteger a vida aquática e o meio ambiente; níveis elevados indicam poluição contínua e exigem ações de controle urgente.

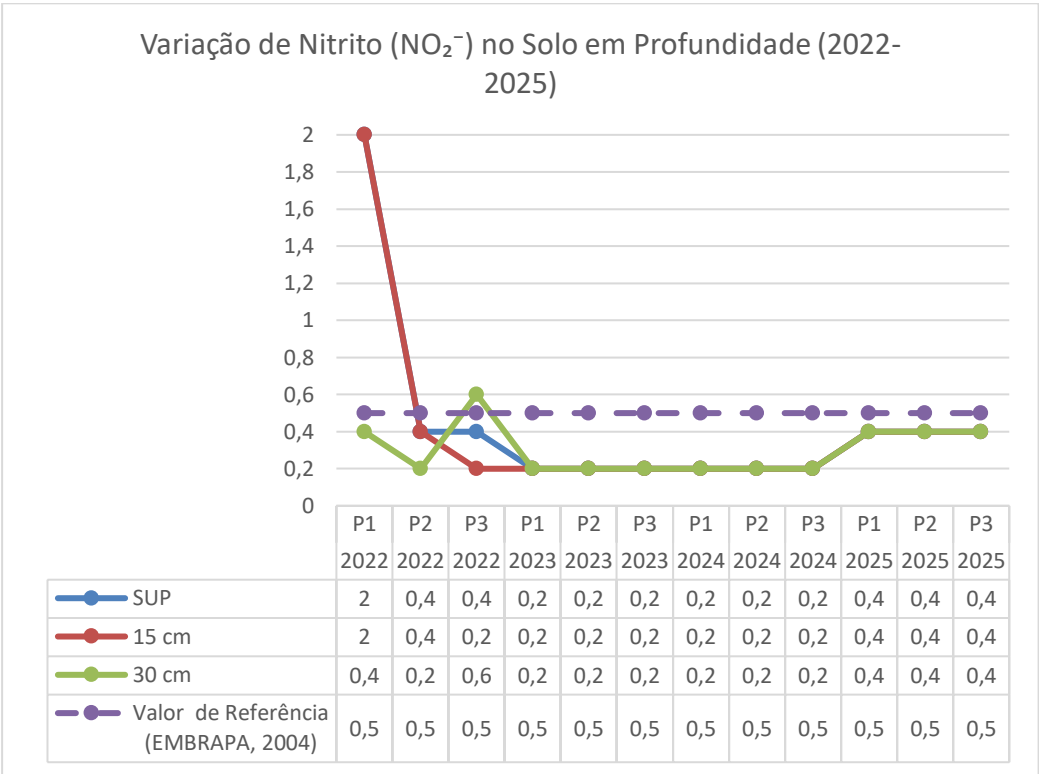
5.5 Análise de Nitrito nos Solos e Sedimentos

O nitrito (NO_2^-) é um composto intermediário do ciclo do nitrogênio, cuja presença em solos e sedimentos, mesmo em baixas concentrações, pode indicar desequilíbrios microbiológicos ou contaminação por esgoto e fertilizantes, afetando a qualidade ambiental. O estudo analisou nitrito nos pontos de solo (P1, P2, P3) e sedimento (P4, P5) entre 2022 e 2025, comparando os resultados aos limites da EMBRAPA (0,5 mg/kg para solos) e CETESB (1,0 mg/kg para sedimentos).

5.5.1 Nitrito no Solo

Os resultados obtidos no Gráfico 9 revelam que, em 2022o ponto P1 apresentou teores de nitrito significativamente acima do limite de referência, enquanto os níveis de amônia permaneceram dentro dos padrões aceitáveis, indicando uma possível oxidação parcial do nitrogênio amoniacal na área (2 mg/kg nas camadas superficial e de 15 cm), sugerindo forte aporte nitrogenado. Já os pontos P2 e P3 mantiveram-se dentro dos limites, com exceção da camada de 30 cm do P3 (0,6 mg/kg).

Gráfico 9 – Concentração de Nitrito nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.

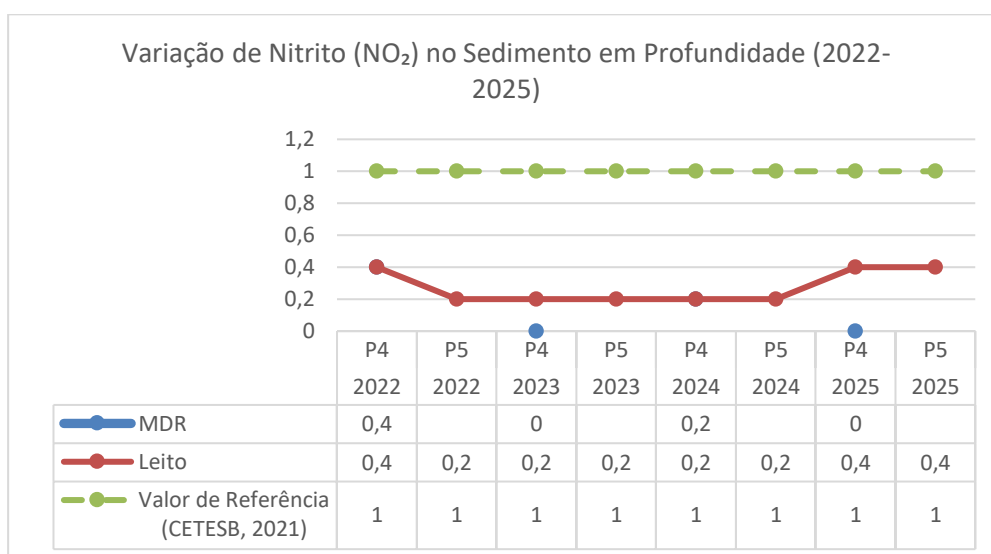


Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2004).

Em 2023 e 2024, os níveis de nitrito permaneceram estáveis e dentro do limite da EMBRAPA ($\leq 0,5$ mg/kg), indicando degradação natural ou ausência de novas fontes poluentes. Já em 2025, observou-se aumento nos teores em todos os pontos, chegando a 0,4 mg/kg. Embora ainda dentro do limite, esse aumento pode refletir o retorno de atividades humanas ou desequilíbrios nos processos de nitrificação e desnitrificação, especialmente em áreas urbanas com pouca vegetação.

5.5.2 Nitrito nos Sedimentos

As análises de nitrito nos sedimentos representadas no Gráfico 10 mostraram baixa variabilidade e, de forma geral, valores seguros em relação ao limite de 1,0 mg/kg estabelecido pela CETESB (2021). Os pontos P4 e P5 apresentaram teores de 0,4 mg/kg em 2022 e 2025, com concentrações de 0,2 mg/kg nos anos intermediários.

Gráfico 10 – Concentração de Nitrito nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.

Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); CETESB (2021).

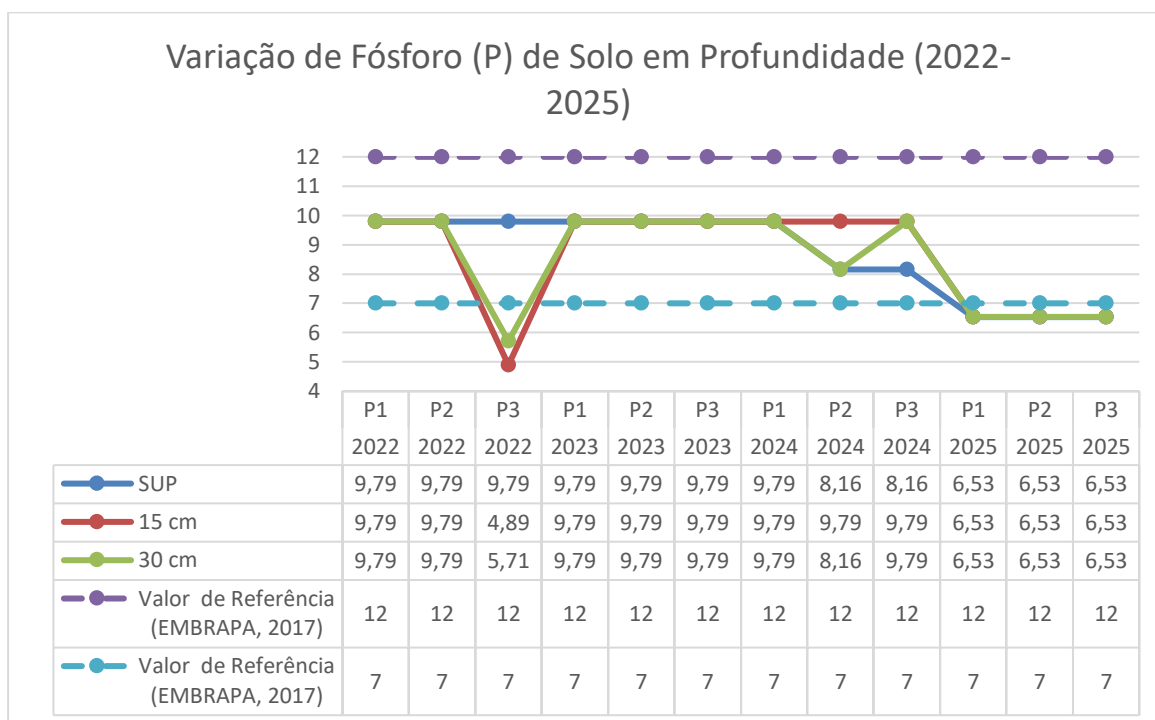
Devido a condições climáticas adversas, não foi possível coletar amostras no ponto P4 em 2023 e 2025, o que compromete a análise completa desses anos. Apesar dos níveis de nitrito estarem dentro dos limites, o monitoramento contínuo é fundamental, pois o acúmulo de compostos nitrogenados pode causar eutrofização, impactar a vida aquática e representar risco à saúde pública em áreas de captação de água.

5.6 Análise de Fósforo nos Solos e Sedimentos

O fósforo (P) é essencial para a produtividade vegetal, mas em excesso pode causar eutrofização em ambientes aquáticos. A análise total de fósforo foi feita convertendo fosfato em fósforo com fator 0,326. Os resultados dos pontos de solo (P1, P2, P3) e sedimentos (P4, P5) foram comparados aos limites de 12 mg/kg para solos (EMBRAPA) e 500 mg/kg para sedimentos (CETESB).

5.5.1 Fósforo no Solo

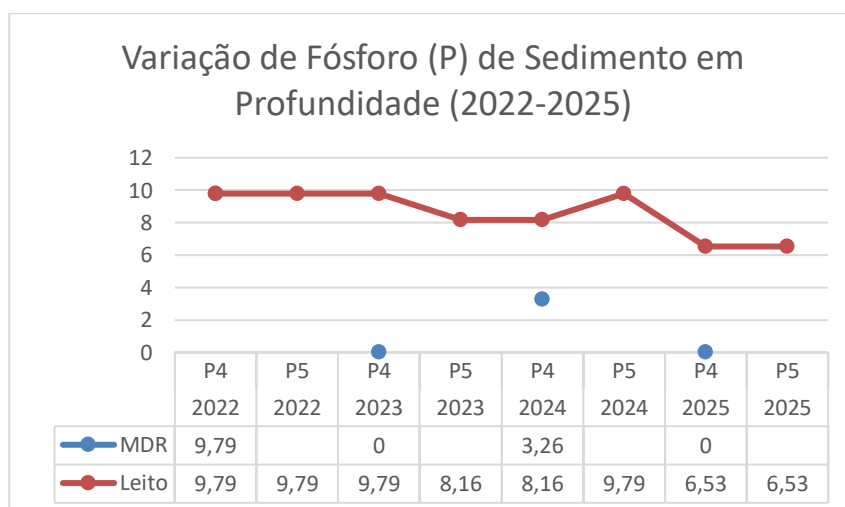
Entre 2022 e 2025, os níveis de fósforo no solo variaram, mas permaneceram abaixo do limite de 12 mg/kg. Em 2022 e 2023, os valores foram estáveis, com exceção de P3, que apresentou níveis mais baixos. Em 2024, houve leve redução em P2 e P3, e em 2025 todos os pontos registraram 6,53 mg/kg, indicando possível esgotamento do fósforo disponível ou menor influência de fontes antrópicas.

Gráfico 11 – Concentração de Fósforo nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.

Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2017).

5.5.2 Fósforo nos Sedimentos

Nos sedimentos, os teores de fósforo mantiveram-se significativamente abaixo do valor de referência de 500 mg/kg estabelecido pela CETESB (2021) como observado no Gráfico 12. Em 2022, os valores nos pontos P4 e P5 foram de 9,79 mg/kg. Já em 2023, o ponto P5 apresentou leve queda (8,16 mg/kg), enquanto não foi possível realizar a coleta no ponto P4 (MDR) devido às condições climáticas adversas e impossibilidade de acesso ao centro do rio.

Gráfico 12 – Concentração de Fósforo nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.

Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); CETESB (2021).

Em 2024, o fósforo no ponto P4 reduziu para 3,26 mg/kg e manteve-se estável em P5 (9,79 mg/kg). Em 2025, ambos os pontos registraram queda para 6,53 mg/kg. Apesar de não atingirem níveis críticos, a presença de fósforo pode representar riscos cumulativos à biota aquática. Os dados foram padronizados por meio da conversão de fosfato para fósforo, garantindo a comparabilidade com os limites de segurança.

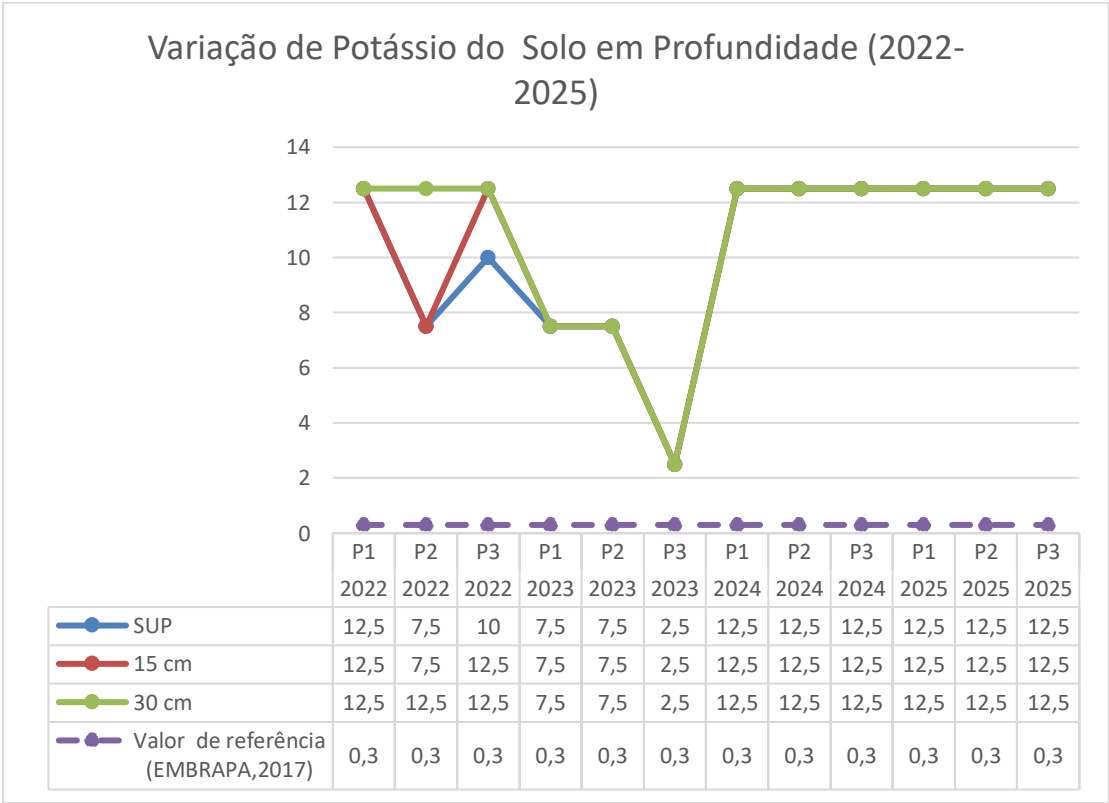
5.6 Análise de Potássio nos Solos e Sedimentos

O potássio (K) é um macronutriente vital para o crescimento vegetal e processos fisiológicos. Sua presença em solos e sedimentos indica fertilidade natural ou influência humana, como uso de fertilizantes. As análises foram feitas com kit Alfakit, comparando resultados aos limites da EMBRAPA (0,3 cmolc/dm³ para solos) e CETESB (120 mg/kg para sedimentos).

5.6.1 Potássio no Solo

Os resultados mostraram valores de cálcio e magnésio muito acima do limite de 0,3 cmolc/dm³ da EMBRAPA em todos os pontos e anos. Em 2022, variaram entre 7,5 e 12,5 cmolc/dm³; em 2023 houve queda, especialmente em P3 (2,5 cmolc/dm³). Em 2024 e 2025, os níveis retornaram a 12,5 cmolc/dm³, indicando recuperação.

Gráfico 13 – Concentração de Potássio nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.



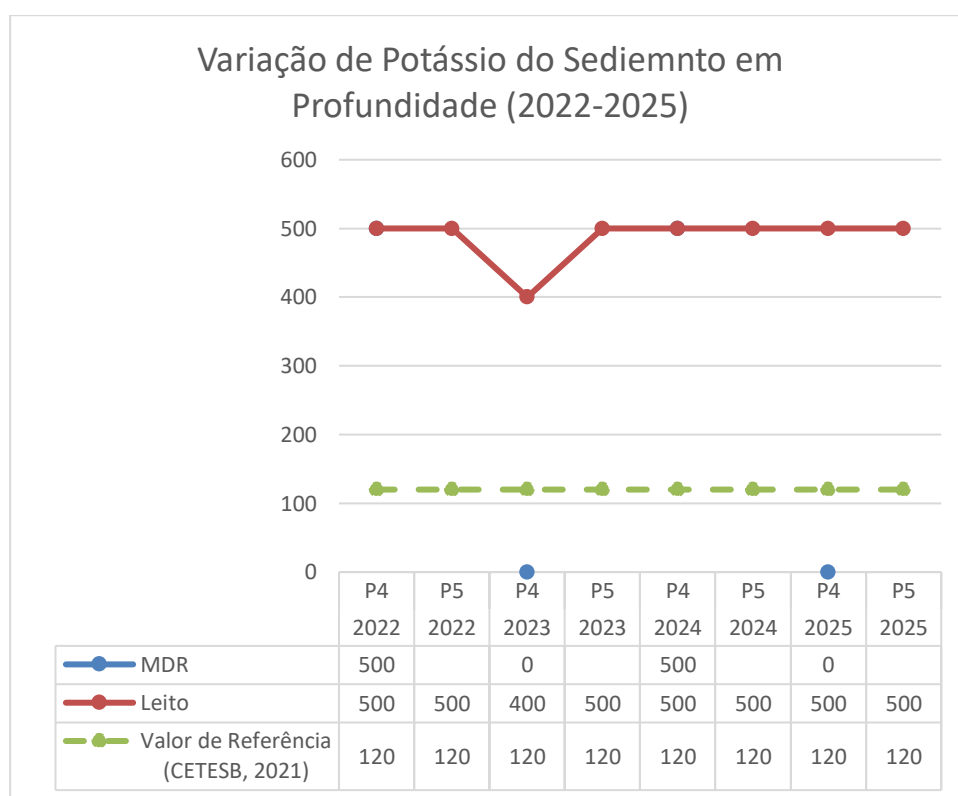
Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2017).

Esse padrão pode ser reflexo tanto do uso de fertilizantes potássicos quanto da dinâmica de absorção e lixiviação do nutriente nos diferentes pontos analisados. Ainda que elevados, os valores não indicam risco ambiental imediato, mas reforçam a necessidade de manejo adequado da fertilização.

5.6.2 Potássio nos Sedimentos

Nos sedimentos, os teores de potássio mantiveram-se bem abaixo do valor de referência de 120 mg/kg definido pela CETESB (2021), com exceção de alguns casos pontuais (Gráfico 14). Em 2022, o ponto P4 apresentou 500 mg/kg, o que pode indicar acúmulo antrópico. Em 2023, não foi possível realizar a coleta no ponto P4 (MDR) devido às condições climáticas adversas, impossibilitando o acesso ao centro do rio. No entanto, o ponto P5 manteve valor elevado (500 mg/kg).

Gráfico 14 – Concentração de Potássio nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.



Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); CETESB (2021).

Em 2024 e 2025, os pontos P4 e P5 apresentaram valores constantes de potássio de 500 mg/kg, com ausência de coleta em P4 em 2025. Essa estabilidade indica possível presença contínua de fontes externas, como resíduos ou fertilizantes, no ambiente aquático.

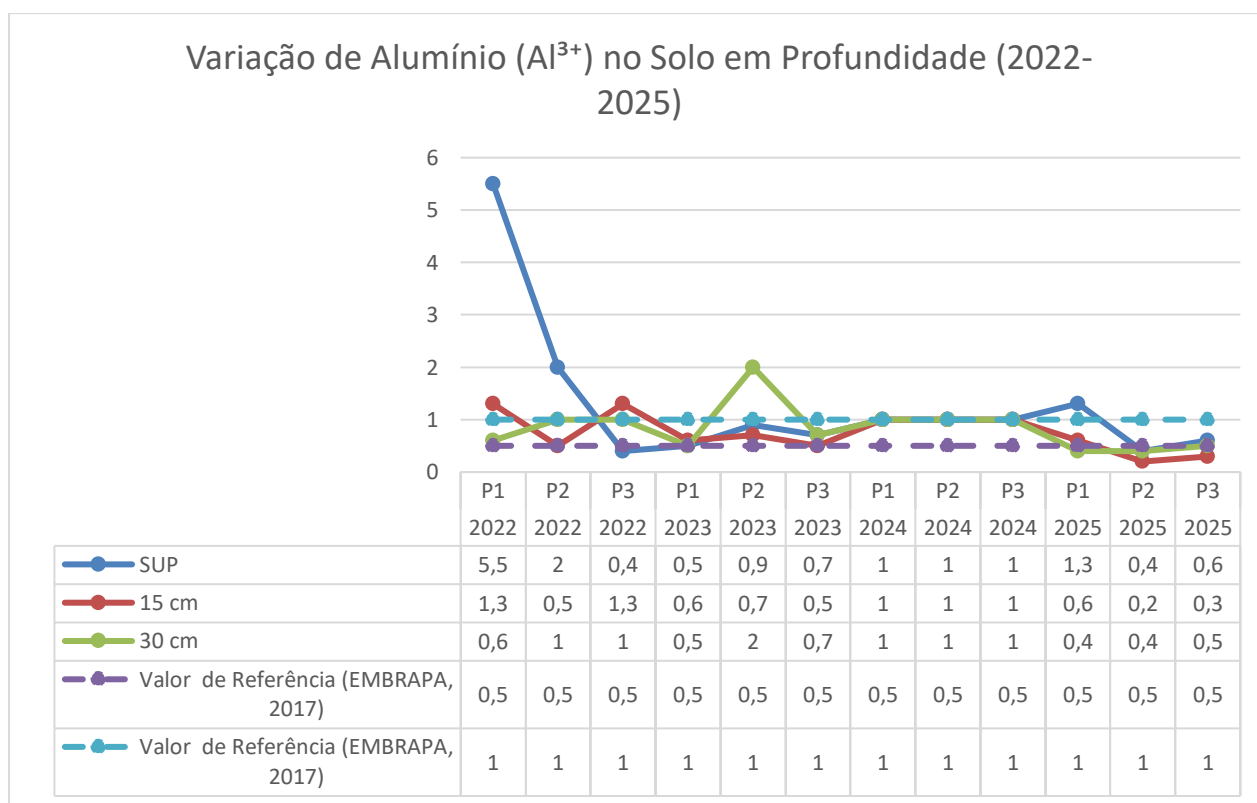
5.7 Análise de Alumínio nos Solos e Sedimentos

O alumínio (Al^{3+}) é tóxico para plantas em altas concentrações, especialmente em solos ácidos. Sua análise é crucial para avaliar riscos ao solo e à biota terrestre. Neste estudo, os valores foram comparados ao limite de $0,5 \text{ cmolc/dm}^3$ para solos (EMBRAPA, 2017). Embora a CETESB não estabeleça referência para sedimentos, estudos sugerem $1,0 \text{ mg/kg}$ como limite indicativo de risco ambiental em ambientes aquáticos.

5.7.1 Alumínio no Solo

No Gráfico 15 observa-se que os valores de alumínio obtidos variaram consideravelmente entre os anos e pontos de coleta. Em 2022, o ponto P1 apresentou $5,5 \text{ cmolc/dm}^3$ na superfície, valor expressivamente acima do limite recomendado, seguido por redução nas camadas mais profundas. O ponto P2 registrou níveis altos na superfície e profundidade de 30 cm ($2,0$ e $1,0 \text{ cmolc/dm}^3$), enquanto o ponto P3 teve concentrações menores.

Gráfico 15 – Concentração de Alumínio nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.



Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2017).

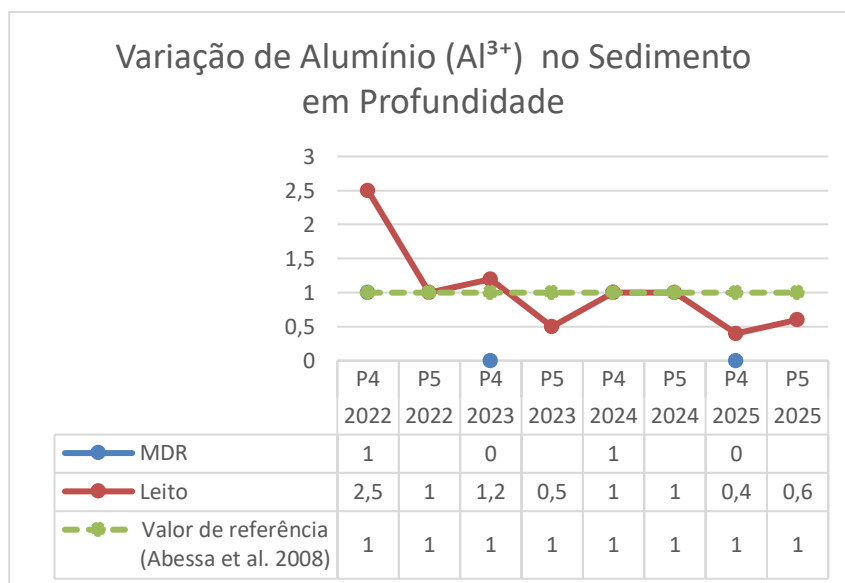
A partir de 2023, houve significativa redução nos teores de alumínio em todos os pontos, com destaque para os valores padronizados em $1,0 \text{ cmolc/dm}^3$ em 2024 e pequenas variações em 2025. A diminuição dos teores pode ser atribuída a práticas de

correção da acidez ou maior estabilidade do solo.

5.7.2 Alumínio nos Sedimentos

No Gráfico 16, os teores de alumínio nos sedimentos ficaram geralmente abaixo ou próximos ao limite indicativo de 1,0 mg/kg. Em 2022, P4 e P5 registraram 2,5 e 1,0 mg/kg, respectivamente. Coletas em P4 não ocorreram em 2023 e 2025 por condições climáticas, enquanto P5 manteve níveis baixos entre 0,5 e 0,6 mg/kg.

Gráfico 16 – Concentração de Alumínio nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.



Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); Abessa *et al.* (2008).

Essa estabilidade nos níveis de alumínio nos sedimentos sugere que, apesar da presença no solo, o elemento não está sendo transferido de forma significativa para o leito do rio, o que reduz os riscos ecológicos diretos.

5.8 Análise de Cálcio + Magnésio nos Solos e Sedimentos

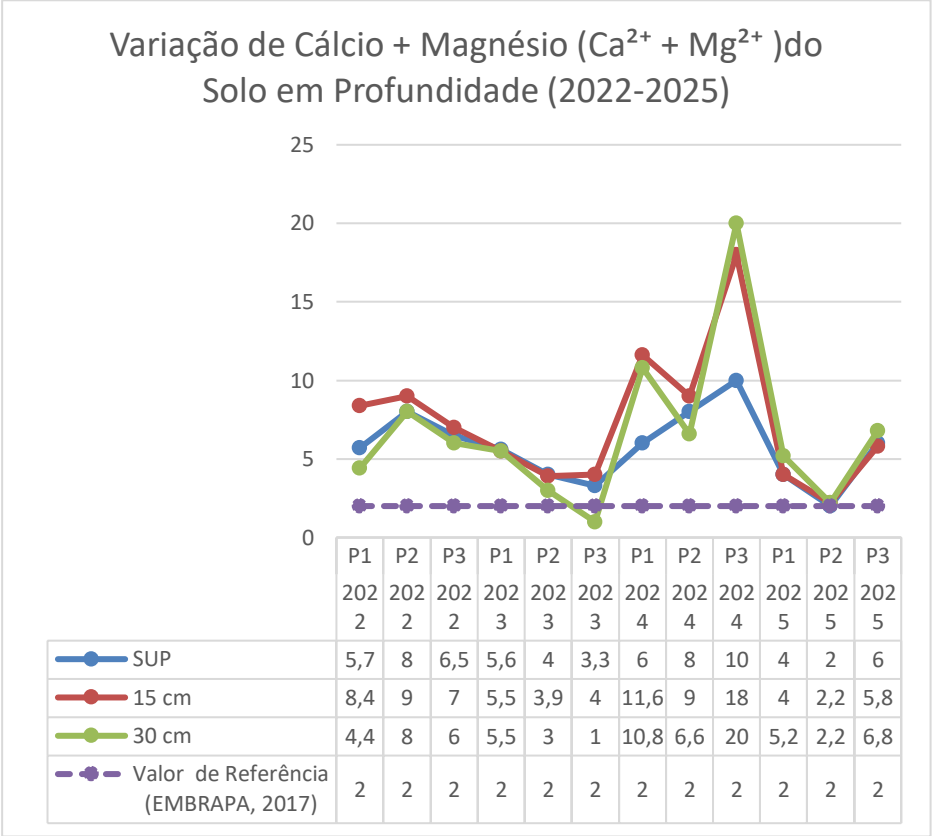
Cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) são cátions básicos essenciais para o equilíbrio químico do solo, crescimento vegetal, fertilidade e controle da acidez. Eles influenciam a saturação por bases e a capacidade de troca catiônica. A análise conjunta usa como referência 2,0 cmolc/dm³ para solos (EMBRAPA, 2017). Para sedimentos, adota-se a média de 6,0 mg/kg sugerida por Minella et al. (2007), já que a CETESB não estabelece valor específico.

5.8.1 Cálcio + Magnésio no Solo

Os resultados mostrados no Gráfico 17 revelam que os teores de cálcio e magnésio nos solos analisados variaram amplamente entre os anos e os pontos. Em 2022, os três

pontos apresentaram valores acima do valor de referência, especialmente nas camadas de 15 e 30 cm. No entanto, a partir de 2023, observou-se um declínio, com teores mais próximos do limite de referência da EMBRAPA (2,0 cmolc/dm³), principalmente nos pontos P2 e P3.

Gráfico 17 – Concentração de Ca²⁺ + Mg²⁺ nos Solos (P1, P2 e P3) entre 2022 e 2025.

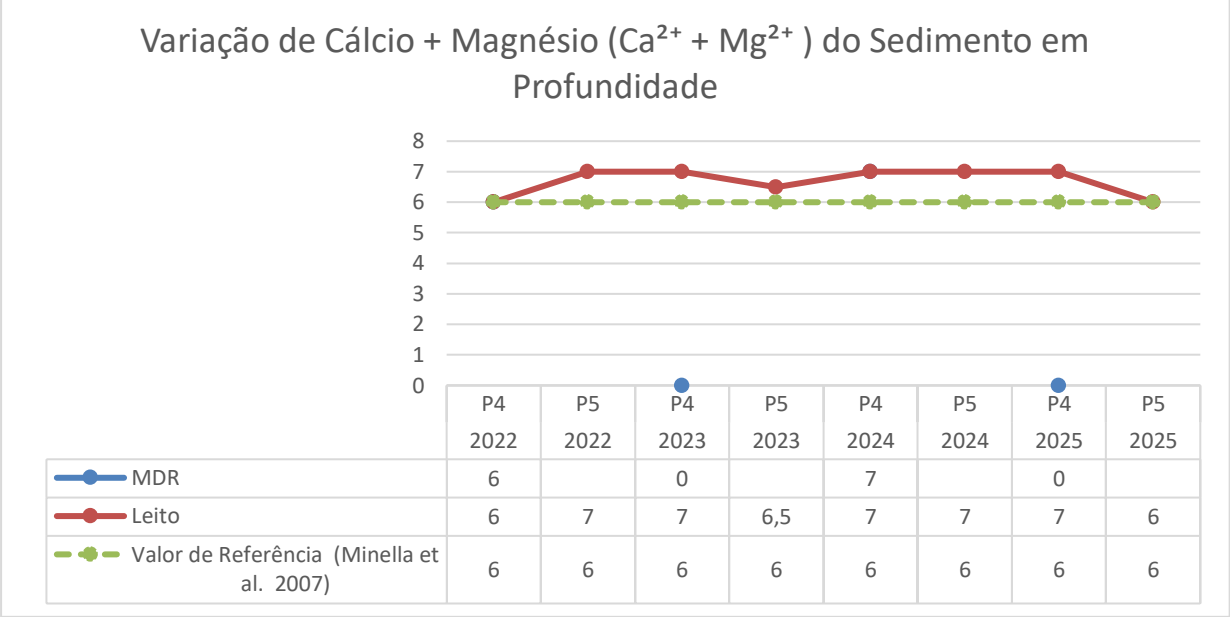


Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); EMBRAPA (2017).

5.8.2 Cálcio + Magnésio nos Sedimentos

Os teores de cálcio e magnésio nos sedimentos foram estáveis (6,0 a 7,0 mg/kg) ao longo de quatro anos. Coletas em P4 não ocorreram em 2023 e 2025 devido ao clima, mas os demais pontos mostraram estabilidade química sem impactos críticos.

Gráfico 18 – Concentração de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ nos Sedimentos (P4 e P5) entre 2022 e 2025.



Fonte: Dados da pesquisa (2022–2025); Minella *et al.* (2007).

6 CONCLUSÕES

A análise química dos solos e sedimentos realizada no perímetro urbano do rio Grajaú entre os anos de 2022 e 2025 permitiu identificar importantes variações nos parâmetros avaliados, evidenciando impactos antrópicos, práticas de uso e ocupação do solo e alterações nos processos ambientais da região.

Os resultados demonstraram que os solos nos pontos P1, P2 e P3 apresentam concentrações variáveis de nutrientes e elementos químicos ao longo dos anos, com destaque para o acúmulo de fósforo e potássio acima dos valores de referência, indicando possível influência do uso de fertilizantes em áreas adjacentes. Por outro lado, os teores de alumínio e amônia em alguns pontos apresentaram valores críticos ou em declínio, sugerindo processos de acidificação e degradação química.

Nos sedimentos, os valores encontrados também refletiram interferências ambientais significativas, especialmente nos pontos P4 e P5. Parâmetros como fósforo, potássio e cálcio + magnésio mantiveram-se acima dos valores de referência propostos pela literatura consultada, reforçando a hipótese de acúmulo por deposição de material particulado proveniente de atividades humanas e pelo escoamento superficial.

Além disso, a ausência de dados em alguns pontos e anos — especialmente nos locais de difícil acesso (MDR) — devido às condições climáticas desfavoráveis, evidenciou os desafios logísticos enfrentados em coletas de campo em áreas fluviais. Ainda assim, as séries temporais permitiram comparações significativas, e os dados obtidos contribuíram para o diagnóstico da qualidade ambiental da bacia.

Dessa forma, o estudo reforça a importância do monitoramento contínuo dos solos e sedimentos como ferramenta fundamental para a gestão ambiental e a recuperação de áreas degradadas, especialmente em regiões que sofrem intensa pressão antrópica. Os resultados obtidos poderão subsidiar ações educativas, políticas públicas e futuras intervenções voltadas à conservação e uso sustentável dos recursos naturais do rio Grajaú.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS

A presente pesquisa revelou importantes indícios da degradação ambiental e da influência antrópica nos solos e sedimentos da região dos balneários do rio Grajaú. Com base nos dados obtidos, algumas perspectivas futuras se tornam relevantes tanto do ponto de vista científico quanto social.

Do ponto de vista técnico e acadêmico, recomenda-se a continuidade do monitoramento periódico dos parâmetros físico-químicos do solo e dos sedimentos, com a ampliação da rede de pontos de coleta, inclusive em áreas rurais adjacentes, a fim de mapear com maior precisão as fontes de contaminação e a extensão dos impactos ambientais. Também é desejável incorporar análises microbiológicas e de metais pesados, bem como modelagens estatísticas e geoespaciais, para melhor compreensão da dinâmica dos processos de degradação e recuperação.

Além disso, o desenvolvimento de projetos interdisciplinares envolvendo instituições de ensino, poder público e comunidades locais poderá promover ações concretas de recuperação ambiental, como reflorestamento das matas ciliares, técnicas de manejo sustentável do solo e educação ambiental voltada à conservação dos recursos hídricos. A adoção de práticas agroecológicas e o incentivo à agricultura de base sustentável também se apresentam como alternativas viáveis para mitigar os impactos observados.

Por fim, espera-se que os dados e reflexões gerados por este trabalho possam subsidiar futuras políticas públicas voltadas à proteção do rio Grajaú, contribuindo para o fortalecimento da gestão ambiental no município e para a formação de uma consciência coletiva sobre a importância da preservação dos ecossistemas fluviais urbanos.

REFERÊNCIAS

ABESSA, D. M.S; CARR, R.S; SOUSA, E.C.P.M.; RACHID, B.R.F.; ZARONI, L.P.; GASPARRO, M.R.; PINTO, Y.A.; BÍCEGO, M.C.; HORTELLANI, M.A.; SARKIS, J.E.S.; MUNIZ, P. **Integrative Ecotoxicological Assessment Of Contaminated Sediments In A Complex Tropical Estuarine System**. In: HOFER, Tobias N. *Marine Pollution: New Research*. New York: Nova Science Publishers, 2008. cap. Capítulo 4, p. 125-160. ISBN 9781604562422.

ALFAKIT. **Manual técnico do Ecolit Solo: kit de análise de solo e água**. Florianópolis: Alfabeta Equipamentos, 2023. Disponível em: <https://www.alfakit.com.br> . Acesso em: 14 jul. 2025.

ALVES, Sandra Maria Barros. **Educação no Sertão Centro-Sul maranhense (1965-1980)**. Campinas: Pangéia Editorial, 2024.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Programa Produtor de Água: resultados e lições aprendidas**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br> . Acesso em: 14 jul. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Orientações para avaliação da qualidade de sedimentos em corpos d'água interiores no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/publicacoes-tecnicas/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Programa de monitoramento da qualidade dos sedimentos: relatório técnico**. São Paulo: CETESB, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/> . Acesso em: 14 jul. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade dos Sedimentos em Rios e Reservatórios do Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2017.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. atual. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 627 p. ISBN 85-7383-274-9.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de calagem e adubação para o estado do Maranhão**. São Luís: Embrapa Cacaos, 2017. 224 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. atual. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2017.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs> . Acesso em: 14 jul. 2025.

embrapa, R. **Recuperação de Áreas Degradadas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/programas-e-projetos/item/8705-recupera%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1reas-degradadas.html> .

Acesso em: 14 jul. 2025.

MINELLA, Jean Paolo Gomes; MERTEN, Gustavo Henrique; REICHERT, José Miguel; SANTOS, Danilo Rheinheimer dos. **IDENTIFICAÇÃO E IMPLICAÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO DO SOLO DAS FONTES DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, ed. 6, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000600039. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/RGKRtfsRZJByjJGzjxWh7D/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MOREIRA, Fátima Maria de Souza; SIQUEIRA, José Oswaldo. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. atual. e aum. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p. ISBN 85-87692-33-x.

PREZOTTI, Luiz Carlos.; GUARÇONI, André Martins. **Guia de Interpretação de Análise de Solo e Foliar**. Vitória: Incaper, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.incaper.es.gov.br>. Acesso em: 14 jul. 2025.

QUEIROZ, Matheus Silveira de; NETO, Antonio Gomes Tomaz; ALVES, Neliane de Sousa; BATISTA, Selma Paula Maciel. **Expedição Mindu: Análise Geográfica do Igarapé do Mindu**. E-book: Workshop sobre planejamento e desenvolvimento sustentável em Bacias Hidrográficas. 1. ed. Manaus: Editora UFRR, 2020. p. 921-932. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340539298_Expedicao_Mindu_Analise_Geografica_do_Igarape_do_Mindu. Acesso em: 14 jul. 2025.

RIBEIRO, Felipe Medrado S.; MENEZES, Rubens A.; LOPES, Robério Cavalcante M. **Funções ecológicas da vegetação ciliar: revisão de literatura**. Revista Biociências, Taubaté, v. 27, n. 1, p. 75–89, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21439/rb.v27i1.3023>.

RICHARDSON, Alan E.; LYNCH, Jonathan P.; RYAN, Peter R.; DELHAIZE, Emmanuel; SMITH, F. Andrew; SMITH, Sally E.; HARVEY, Paul R.; RYAN, Megan H.; VENEKLAAS, Erik J.; LAMBERS, Hans; OBERSON, Astrid; CULVENOR, Richard A.; SIMPSON, Richard J. **Plant and microbial strategies to improve phosphorus efficiency of agriculture**. Plant and Soil, v. 349, p. 121-159, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4>.

RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; GANDOLFI, Sergius; BARBOSA, Luiz Mauro; VIANI, Ricardo Augusto Gorne. **Restauração ecológica de florestas tropicais: estágio atual**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2015. p. 440 : il. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutodebotanica/vi-simposio-de-restauracao-ecologica/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

ROSSIGNEUX, Luiz Guilherme Quintas; SCHETTIN, Cristina Finger Lacerda; ROSA, Altair. **A Influência Da Mata Ciliar Na Qualidade Da Água Em Bacias Urbanas: Estudo De Caso Do Rio Belém**. XX SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves. 2013. ISSN: 2318-0358.

SILVA, Angelino P.; ANDRADE, Adriano G. **Matéria orgânica e sua importância para a qualidade do solo**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 5, n. 4, p. 116–124, 2010.

SILVA, Mario Almeida M.; IUBEL, Juliana Pisa G.; BRAGA, Sergio Michelotto; FERNANDES, Cristovão Vicente Scapulatempo. **Avaliação da qualidade do sedimento com base no Índice de Qualidade Geoquímica (IQG)**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 2017. Porto Alegre: ABRHidro, 2017. ISSN: 2318-0358.

SODRZEIESKI, Pedro Alexandre; ANDRADE, Leonardo Capeleto de; TIECHER, Tales; CAMARGO, Flávio Anastácio de Oliveira. **Variabilidade físico-química e poluição por metais pesados em trecho não canalizado do Arroio Dilúvio (RS) e a influência do trecho canalizado na poluição dos sedimentos**. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v. 14, n. 2, p. 115–129, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2285>.

TORRES, Daniel Otávio.; MARTINS, Pedro Anchieta; BARBOSA, Roberto S. **Fertilidade do solo em áreas degradadas por uso antrópico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20200080>.

VILELA, Lourival; SOUSA, Djalma M. G. de.; SOARES, Wilson Vieira; MACEDO, Manoel Cláudio M. **Calagem e adubação para culturas anuais e perenes no Cerrado**. Brasília: Embrapa, 1998. p. 39–75. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/562024>. Acesso em: 11 jul. 2025.

INFOTECA-E. **Uso de resíduos de construção e demolição na correção do solo**. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para o Manejo Sustentável do Solo, 2020. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/11111>. Acesso em: 12 ago. 2025.