UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI - URCA

CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CCBS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA BIOLÓGICA - PPQB

LIGIA MARIA DA SILVA

AVALIAÇÃO DOS RISCOS AMBIENTAL E CARCINOGÊNICO ASSOCIADOS A METAIS TRAÇO EM SOLOS DO LEITO DO RIO SALGADO NO CARIRI CEARENSE

CRATO

2026

UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA BIOLÓGICA

LIGIA MARIA DA SILVA

AVALIAÇÃO DOS RISCOS AMBIENTAL E CARCINOGÊNICO ASSOCIADOS A METAIS TRAÇO EM SOLOS DO LEITO DO RIO SALGADO NO CARIRI CEARENSE

Defesa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química Biológica, da Universidade Regional do Cariri, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Química Biológica.

Orientadora: Lígia Cláudia Castro de Oliveira

Coorientador: Francisco Alixandre Ávila Rodrigues

CRATO

2026

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL DA UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI - URCA
URCA

(anexar no verso na folha II, na versão final em capa dura - E-mail biblioteca@urca.br,)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI - URCA

Ficha Catalográfica elaborada pelo autor através do sistema
de geração automático da Biblioteca Central da Universidade Regional do Cariri - URCA

Silva, Ligia Maria da

S586 AVALIAÇÃO DOS RISCOS AMBIENTAL E CARCINOGÊNICO ASSOCIADOS A METAIS TRAÇO EM SOLOS DO LEITO DO RIO SALGADO NO CARIRI CEARENSE / Ligia Maria da Silva. Crato - Ce, 2026.

96p. il.

Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Química Biológica da Universidade Regional do Cariri - URCA.

Orientador(a): Prof.ª Dr.ª Lígia Cláudia Castro de Oliveira

Coorientador(a): Prof. Dr. Francisco Alixandre Ávila Rodrigues

1.Metais traços, 2.FAAS, 3.Solos, 4.Sedimentos fluviais, 5.Avaliação de risco a saúde humana; I.Título.

CDD: 577

LIGIA MARIA DA SILVA

AVALIAÇÃO DOS RISCOS AMBIENTAL E CARCINOGÊNICO ASSOCIADOS A METAIS TRAÇO EM SOLOS DO LEITO DO RIO SALGADO NO CARIRI CEARENSE

Defesa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química Biológica, da Universidade Regional do Cariri, como requisito necessário para obtenção do Título de Mestre em Química Biológica.

Relatório de Defesa, Dissertação defendida e aprovada em: ___/____/2026.

BANCA EXAMINADORA

_____

Profa. Dra. Lígia Cláudia Castro de Oliveira

Orientadora - URCA.

_____

Prof. Dr. Francisco Alixandre Ávila Rodrigues.

Coorientador - UFCA

_____

Prof. Dr. Francisco José de Paula Filho

Membro avaliador interno - UFCA

_____

Profa. Dra. Maria Karollyna do Nascimento Silva Leandro

Membro avaliador externo - UFCA

_____

Profa. Dra. Roseli Barbosa

Membro suplente avaliador interno - URCA

_____

Prof. Dr. Jorge Marcell Coelho Menezes

Membro suplente avaliador externo - URCA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida e pela graça de me conduzir com fé, força e sabedoria ao longo desta jornada.

À minha família, minha base e fortaleza, que sempre esteve ao meu lado com amor incondicional. Aos meus pais, Maria das Graças e Damião por todo o carinho, apoio e ensinamentos que foram alicerces nos momentos mais desafiadores. Ao meu marido, Tallison, meu companheiro incansável, por acreditar em mim mesmo nos dias mais turbulentos, por seu amor, paciência e presença constante em cada passo desta caminhada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Lígia Cláudia Castro de Oliveira e coorientador Prof. Dr. Francisco Alixandre Ávila Rodrigues pela orientação e apoio essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Química Biológica da URCA, pela excelência na formação e por despertarem em mim o olhar crítico e científico que levarei por toda a vida.

Aos membros da banca examinadora, pela leitura atenta e pelas contribuições valiosas que enriqueceram esta pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa em Espectroanalítica Química Biológica e Ambiental (LEQBA), especialmente Álvaro e Luana, pelo apoio técnico, parceria e colaboração ao longo da pesquisa.

Aos colegas de sala e de pesquisa, pela parceria, troca de saberes e apoio mútuo, que tornaram essa trajetória mais leve e enriquecedora.

Às instituições que tornaram esta pesquisa possível, oferecendo estrutura, apoio técnico e os recursos necessários para o seu desenvolvimento.

Às amigas Fabiana e Sarah, pelo incentivo constante e pela amizade que me fortaleceu desde o início desta caminhada.

Agradecimentos a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pelo financiamento do projeto de pesquisa identificado pelo número BP5-0197-00179.01.00/22 por meio do programa - Bolsa de Produtividade em Pesquisa, Estímulo à Interiorização e à Inovação Tecnológica – BPI.

Muito obrigado.

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, por me conceder força durante toda esta jornada. À minha família, em especial aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio constante e por sempre acreditarem em mim. Ao meu marido, Tallison, por caminhar ao meu lado com paciência, incentivo e carinho, mesmo diante dos desafios que o mestrado impôs, sua presença foi fundamental em cada conquista. A minha orientadora, professores e colegas que fizeram parte desta caminhada acadêmica, contribuindo com conhecimento.

“Eu sou aquela mulher que fez a escalada da montanha da vida, removendo pedras e plantando flores."

— Cora Coralina

TABELAS, FIGURAS E ANEXOS

QUADROS **Página**

Quadro 1 - Estudos correlatos sobre avaliação de risco carcinogênico associados a metais em solos. 30

Quadro 2 - Figuras de mérito do método analítico por FAAS. 36

Quadro 3 - Classificação dos valores de I_{geo}, PLI e CF. 39

Quadro 4 - Valores padrão utilizados para estimativa da ingestão diária por via oral. 40

Quadro 5 - Valores padrão utilizados para estimativa da ingestão diária via absorção dérmica. 41

Quadro 6: Valores do fator de inclinação de conversão (CSF) para metais-traço no solo por diferentes vias de exposição. 43

Quadro 7 - Comparação teores de metais traços em solos desta pesquisa com estudos regionais, nacionais e internacionais. 63

FIGURAS **Página**

Figura 1 -Testemunhos dos quatro pontos de coleta. 33

Figura 2 - Mapa dos pontos de coleta de solo e sedimentos no Rio Salgado. 34

Figura 3 - Fator de contaminação para o Sítio Batateiras (S1). 45

Figura 4 - Fator de contaminação para Lagoa de estabilização (S2). 46

Figura 6 - Fator de contaminação para Riacho dos Macacos (S3). 48

Figura 7 - TCR por ingestão e contato dérmico para crianças. 51

Figura 8 -TCR por ingestão e contato dérmico para adolescentes. 52

Figura 9 -TCR por ingestão e contato dérmico para adultos. 53

Figura 10 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto de coleta Batateiras. 55

Figura 11 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto de Lagoa de Estabilização 56

Figura 12 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto Sitio Carás. 58

Figura 13 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto Riacho dos Macacos. 60

Figura 14 - Índice de carga poluente . 62

Figura 1: Rede de coocorrência de palavras-chave da SciELO, mostrando conexões entre sedimentos, recursos hídricos, qualidade da água e contaminação. 87

Figura 2: Mapa de densidade da ScienceDirect, destacando concentração de metais, biodisponibilidade, toxicidade e riscos ecotoxicológicos. 88

Figura 3: Cluster temático do PubMed, destacando remediação de sedimentos, fitorremediação, técnicas analíticas e avaliação de risco em estratégias sustentáveis. 89

ANEXOS

Anexo 1: Termo de Autorização para Publicação de Teses e Dissertações Eletrônicas 74

Artigo 1 – “Remediation of soils contaminated by toxic metals: a review of sources, impacts and analytical techniques 76

SIGLAS E ABREVIATURAS

AAS	Espectrometria de Absorção Atômica
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CF	*Contamination Factor* (Fator de Contaminação)
CPRM	SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL
Cr	Cromo
CR	Risco Carcinogênico
Cu	Cobre
Co	Cobalto
EDTA	Ácido etilenodiaminotetracético
EPA	*Environmental Protection Agenc*y (Agência de Proteção Ambiental dos EUA)
FAAS	Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (Flame FAAS)
Fe	Ferro
GFAAS	Espectrometria de Absorção Atômica com Forno de Grafite
HCl	Ácido Clorídrico
HNO_3	Ácido Nítrico
HQ	*Hazard quotient* (Quociente de Perigo)
HI	*Hazard Index* (índice de Perigo)
ICP-MS	Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado
LOD	Limite de Detecção
LOQ	Limite de Quantificação
Mn	Manganês
Ni	Níquel
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLI	*Pollution Load Index* (Índice de Carga de Poluição)
Igeo	Índice de geoacumulação
XRF	Fluorescência de Raios X
Zn	Zinco

SUMÁRIO

8
CAPÍTULO- 1 **16**
1. INTRODUÇÃO GERAL **16**
1.1 Estratégias de pesquisa 16
Objetivos **20**
Objetivo geral 20
Objetivos específicos 20
Objetivos e Questões de Pesquisa 20
CAPÍTULO-2 **22**
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **22**
2.2 Contaminação por Metais Tóxicos em Solos 23
2.3 Avanços Metodológicos na Avaliação de Risco e a Relevância 24
2.4 Importância do Rio Salgado para Avaliação Ambiental Regional 25
2.5 Riscos carcinogênicos 27
CAPÍTULO - 3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA. **32**
Artigo 1 – Remediação de solos contaminados por metais tóxicos: uma revisão sobre fontes, impactos e técnicas analíticas. (ANEXO 2). 32
CAPÍTULO - 4 **33**
4. MATERIAS E MÉTODOS **33**
4.1 Mapa/Pontos de Coleta 33
4.2 Tratamento das amostras 34
4.3 Espectrometria de Absorção Atômica de Chama (FAAS) 36
4.4 Risco Ambiental 37
4.5 Avaliação de Risco à Saúde Humana 40
4.5.1. Exposição por ingestão 40
4.5.2. Exposição dérmica 41
4.5.3. Risco Carcinogênico (CR) 42
4.5.4. Risco Carcinogênico Total (TCR) 43
CAPÍTULO- 5 **44**
5. Resultados e Discussão **44**
5.1 Concentrações dos metais nos solos da sub-bacia do Rio Salgado 44
Figura - 6 Fator de contaminação para Riacho dos Macacos (S3). 48
5.2 RISCOS 50
5.2.1. Risco carcinogênico Total para contato dérmico e via oral 50
Figura 7 - TCR por ingestão e contato dérmico para crianças. 51
Figura 8 - TCR por ingestão e contato dérmico para adolescentes. 52
Figura 9 - TCR por ingestão e contato dérmico para adultos. 53
5.2 Avaliação do risco ambiental 54
Figura 10 - Índice de geoacumulação (Igeo) para o ponto de coleta Batateiras. 55
Figura 11 - Índice de geoacumulação (Igeo) para o ponto de Lagoa de Estabilização.

57
Figura 12 - Índice de geoacumulação (Igeo) para o ponto Sitio Carás. 58
Figura 13 - Índice de geoacumulação (Igeo) para o ponto Riacho dos Macacos. 60
Figura 14- Índice de carga poluente . 62

64
CAPÍTULO- 6 **65**
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS **65**
6.2 CONCLUSÃO GERAL 67
7 REFERÊNCIAS **68**
8 PERSPECTIVAS DE INVESTIGAÇÕES FUTURAS **73**
9 ANEXOS: **74**
Anexo 1: Termo de Autorização para Publicação de Teses e Dissertações Eletrônicas 74
Anexo 2 76
Tabela -Índice de geoacumulação : 76
Anexo 3: **76**
Artigo 1 – "Remediation of soils contaminated by toxic metals: a review of sources, impacts and analytical techniques". 76
ABSTRACT **77**
RESUMO **77**
RESUMEN **78**
1 INTRODUÇÃO **78**

AVALIAÇÃO DOS RISCOS AMBIENTAL E CARCINOGÊNICO ASSOCIADOS A METAIS TRAÇO EM SOLOS DO LEITO DO RIO SALGADO NO CARIRI CEARENSE

RESUMO

Esta pesquisa avaliou a contaminação ambiental e o risco carcinogênico associado aos elementos traços Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn em solos do leito do Rio Salgado, na região do Cariri cearense. As amostras foram submetidas a etapa de secagem, digestão ácida e análise por espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS). Foram aplicados índices geoquímicos, como o Fator de Contaminação (CF), Índice de Geoacumulação (Igeo) e Índice de Carga Poluente (PLI), além da avaliação de risco à saúde humana, considerando as vias de ingestão e contato dérmico em diferentes faixas etárias. Os resultados indicaram que Fe e Mn apresentaram maiores concentrações, associadas principalmente a fatores geogênicos e à dinâmica geoquímica dos ambientes fluviais, enquanto Cr, Cu, Ni e Zn refletiram influência combinada de fontes naturais e antrópicas. Os valores de Cr e Ni permaneceram abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, embora alguns pontos tenham apresentado maior carga poluente relativa. A avaliação de risco demonstrou que as vias de ingestão e contato dérmico permaneceram dentro dos limites aceitáveis, especialmente para adultos e adolescentes. Os resultados evidenciam a importância do monitoramento ambiental contínuo e do uso de abordagens probabilísticas na avaliação de risco, contribuindo para o entendimento da dinâmica de metais traços em ambientes semiáridos. A pesquisa está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 3, ODS 6 e ODS 15, ao fornecer subsídios para a gestão ambiental e a proteção da saúde pública.

Palavras-Chave: Metais traço; FAAS; Solos; Sedimentos fluviais; Avaliação de risco à saúde humana.

Agradecimentos: ao Programa de Pós-Graduação em Química Biológica (PPQB/URCA), ao Grupo de Pesquisa em Espectroanalítica Química Biológica e Ambiental (LEQBA), à Central analítica da UFCA e à FUNCAP.

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL AND CARCINOGENIC RISKS ASSOCIATED WITH TRACE METALS IN THE SOILS OF THE SALGADO RIVER BED IN THE CARIRI REGION OF CEARÁ

ABSTRACT

This study evaluated environmental contamination and carcinogenic risk associated with the trace elements Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, and Zn in soils from the Salgado River bed, located in the Cariri region, Ceará, Brazil. The samples were subjected to drying, acid digestion, and analysis by flame atomic absorption spectrometry (FAAS). Geochemical indices were applied, including the Contamination Factor (CF), Geoaccumulation Index (Igeo), and Pollution Load Index (PLI), as well as human health risk assessment using Monte Carlo simulation, considering ingestion and dermal contact pathways across different age groups. The results indicated that Fe and Mn showed the highest concentrations, mainly associated with geogenic factors and the geochemical dynamics of fluvial environments, while Cr, Cu, Ni, and Zn reflected a combined influence of natural and anthropogenic sources. The concentrations of Cr and Ni remained below the limits established by CONAMA Resolution 420/2009, although some sampling points showed higher relative pollution loads. Risk assessment indicated that ingestion and dermal contact pathways remained within acceptable limits, especially for adults and adolescents. However, dermal exposure to Cr presented carcinogenic risk values above the acceptable threshold (1×10^{-6}), particularly for children and adolescents, indicating greater population vulnerability and the need for continuous monitoring.

Overall, the results highlight the importance of environmental monitoring and the application of probabilistic approaches in risk assessment, contributing to the understanding of trace metal dynamics in semi-arid environments. This study is aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 3 (Good Health and Well-being), SDG 6 (Clean Water and Sanitation), and SDG 15 (Life on Land), by providing scientific support for environmental management and public health protection.

Keywords: Trace metals; FAAS; Soils; River sediments, Human health risk assessment.

Acknowledgments: to the Graduate Program in Biological Chemistry (PPQB/URCA), to the Research Group in Chemical, Biological, and Environmental Spectroanalytics (LEQBA), to the analytical center of UFCA, and to FUNCAP.

IMPORTÂNCIA/RELEVÂNCIA PARA A SOCIEDADE

A presente pesquisa tem relevância para a sociedade por investigar a presença de alguns metais naturais e de origem antrópica nos solos do leito do Rio Salgado, no Cariri cearense, buscando compreender como esses elementos se comportam no ambiente e de que forma o contato com o solo pode representar uma via potencial de exposição para a população. O estudo concentra-se na análise de metais como cobalto, cromo, cobre, ferro, manganês, níquel e zinco, elementos que podem estar associados tanto às características naturais do solo quanto às atividades humanas desenvolvidas na região. Para isso, a pesquisa combina a determinação das concentrações desses metais com o uso de ferramentas científicas que auxiliam na avaliação da qualidade ambiental dos solos e na estimativa de possíveis exposições humanas, de maneira preventiva e informativa. Essa abordagem permite produzir dados técnicos que ajudam a compreender melhor a relação entre o ambiente e a saúde, sem assumir conclusões prévias, mas fornecendo bases para análises responsáveis e fundamentadas. Nesse sentido, os resultados gerados podem apoiar o trabalho de órgãos ambientais e gestores públicos, contribuindo para o planejamento de ações de acompanhamento e gestão dos solos, bem como para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à proteção ambiental e à saúde da população. O estudo também reforça a importância do monitoramento contínuo, especialmente em áreas onde o uso do solo e dos recursos naturais faz parte do cotidiano das comunidades locais. Além disso, a pesquisa amplia o conhecimento científico sobre os solos do Cariri cearense, uma região ainda pouco explorada sob esse enfoque, e pode servir de apoio a iniciativas de educação ambiental, ajudando a conscientizar a sociedade sobre a importância da preservação dos solos e dos recursos hídricos. Dessa forma, o trabalho contribui para a integração entre ciência, gestão ambiental e interesse social, oferecendo informações que podem orientar decisões futuras de forma equilibrada e baseada em evidências científicas.

CAPÍTULO- 1

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Estratégias de pesquisa

A presença de metais traços em solos tem sido amplamente discutida na literatura científica em função da persistência desses elementos no ambiente, de sua baixa degradabilidade e do potencial de exposição humana associado ao contato direto com o solo. Estudos recentes indicam que, mesmo quando presentes em concentrações moderadas, os metais podem se acumular ao longo do tempo, influenciando a qualidade ambiental e representando uma preocupação relevante no âmbito da saúde pública, especialmente em áreas submetidas a múltiplas pressões antrópicas (PANQING *et al.,* 2023; SHETTY *et al.*, 2024; IBRAHIM; SELIM, 2022).

A presença de metais traços em solos é um tema recorrente por envolver elementos com potencial de acumulação em compartimentos terrestres, especialmente quando associados a mudanças no uso do solo e pressões antrópicas. Em regiões semiáridas, onde a dinâmica de intemperismo, a cobertura vegetal e os regimes hidrológicos apresentam particularidades, a distribuição destes elementos tende a refletir simultaneamente controles naturais (material de origem, mineralogia e textura) e influências humanas (urbanização, atividades produtivas e disposição de resíduos), o que reforça a relevância de estudos regionalmente contextualizados (CALADO, 2016; COGERH, 2019).

No Ceará, o reconhecimento do pano de fundo geoquímico é essencial para diferenciar assinaturas geogênicas de potenciais aportes antrópicos. O Atlas Geoquímico do Estado do Ceará, por exemplo, constitui uma referência para a compreensão da distribuição espacial de elementos em solos e sedimentos em escala estadual, oferecendo base comparativa para interpretações ambientais em diferentes regiões, incluindo o sul do estado (CALADO, 2016).

No Cariri cearense, a composição mineralógica e a ocorrência de materiais argilosos utilizados pela indústria ceramista regional indicam matrizes ricas em frações finas, o que é relevante porque argilas e óxidos associados tendem a favorecer a retenção/adsorção de diversos elementos traços (SILVA *et al.*, 2021). Estudos experimentais com argilas do Crato (Cariri-CE) mostram a importância de caracterizações físico-química e mineralógicas dessas matrizes, reforçando que as propriedades do solo/argila são determinantes no comportamento geoquímico de metais (SILVA *et al.*, 2021).

Do ponto de vista individual alguns metais como Ferro (Fe) e Manganês (Mn) merecem atenção por sua abundância natural e, principalmente, por influenciarem processos de retenção e liberação de metais via óxidos/hidróxidos e mecanismos de adsorção e coprecipitação. Em solos com maior presença dessas fases minerais, variações nas condições físico-química podem alterar a

disponibilidade de outros metais, tornando Fe e Mn elementos-chave para interpretar a dinâmica geoquímica do sistema, especialmente em ambientes com alternância entre condições mais secas e eventos de fluxo concentrado (CALADO, 2016; SILVA *et al.,* 2021).

Quanto para metais como Cromo (Cr) e Níquel (Ni), são elementos com ocorrência natural associada a determinados materiais de origem, mas também frequentemente citados em estudos ambientais brasileiros por aparecerem em áreas com influência urbana/industrial e em compartimentos associados a cursos d'água. Na região do Cariri, trabalhos acadêmicos discutem metais em ambientes fluviais e sedimentos do leito sob influência de matéria orgânica e processos de mobilidade, trazendo subsídios para compreender como esses elementos podem ser transportados, retidos e redistribuídos em sistemas associados ao vale fluvial (BRITO, 2022).

Para os metais Cobre (Cu) e Zinco (Zn), a literatura nacional aponta ocorrência recorrente em áreas com pressão antrópica, especialmente pela associação com efluentes e resíduos industriais/urbanos e, no caso do Cu, também por usos vinculados a práticas agrícolas em diferentes regiões brasileiras. No contexto do sul do Ceará, estudos e dissertações recentes voltadas a efluentes industriais citam metais como Cr, Ni, Zn e Cu como relevantes em discussões sobre processos produtivos e necessidade de tratamento adequado, o que justifica atenção a esses elementos em avaliações ambientais regionais (OLIVEIRA, 2023).

O Cobalto (Co) tende a ocorrer em concentrações menores e frequentemente acompanha a dinâmica de Fe e Mn em solos, dada sua afinidade por fases minerais e óxidos presentes na matriz. Em abordagens geoquímicas de escala estadual, a presença e distribuição de Co em amostras de solo também aparece como parte do conjunto de elementos mapeados, reforçando a importância de interpretar sua ocorrência à luz do contexto geológico-pedológico local (CALADO, 2016).

O recorte espacial da Bacia Hidrográfica do Rio Salgado é relevante por se tratar de um sistema hidrográfico no sul do Ceará, associado a diferentes usos do território, o que demanda caracterizações que considerem as especificidades regionais. Documentos técnicos da gestão hídrica estadual descrevem a bacia, sua organização e o contexto regional, oferecendo base para situar estudos ambientais e suas motivações no território (COGERH, 2019).

Embora muitos metais traços tenham origem natural, relacionada à composição geológica e mineralógica dos solos, atividades humanas como agricultura intensiva, uso de insumos químicos, lançamento de efluentes urbanos, disposição inadequada de resíduos e processos industriais podem alterar significativamente os padrões naturais de distribuição desses elementos. A literatura destaca que a interação entre fatores geogênicos e antrópicos é determinante para o comportamento geoquímico dos metais nos solos, exigindo abordagens integradas que considerem essas múltiplas fontes (COCÂRȚĂ *et al.*, 2016; SHAHID *et al.,* 2022).

No contexto ambiental, os solos exercem papel fundamental como compartimentos de retenção e redistribuição de metais traços, atuando tanto como reservatórios quanto como fontes secundárias desses elementos para outros compartimentos ambientais, como águas superficiais e subterrâneas. Essa função está diretamente relacionada às características físico-química dos solos, à presença de frações finas, matéria orgânica e óxidos metálicos, que controlam os processos de adsorção, mobilização e retenção dos metais (ASSINE, 1992; BANDEIRA *et al.*, 2021; SILVA *et al.,* 2022). Em bacias hidrográficas sujeitas à urbanização e ao lançamento de efluentes, o solo do leito e das margens dos cursos d'água torna-se um compartimento estratégico na dinâmica desses contaminantes, podendo atuar como receptor temporário e como fonte de liberação gradual ao longo do tempo (ABRAHÃO, 2006; SÁ *et al.,* 2021).

A exposição humana associada aos solos ocorre, principalmente, por meio da ingestão não intencional de partículas e do contato dérmico, especialmente em áreas onde o uso do solo está diretamente relacionado às atividades agrícolas, à ocupação urbana e à proximidade com corpos hídricos. Estudos desenvolvidos em contextos brasileiros indicam que populações que mantêm contato frequente com solos e ambientes fluviais estão potencialmente expostas a contaminantes retidos nesses compartimentos, o que reforça a importância da avaliação integrada entre qualidade ambiental e uso do território (HELENE, 2016; BRITO *et al.,* 2023; SÁ *et al.*, 2021). Nesse sentido, a compreensão do papel dos solos na retenção e redistribuição de metais constitui etapa essencial para análises ambientais e para subsidiar avaliações de risco à saúde humana em escala local e regional.

No Brasil, investigações recentes têm evidenciado a necessidade de aprofundar estudos sobre metais traços em solos, especialmente em regiões onde características naturais específicas se somam a processos intensos de uso e ocupação do solo. Pesquisas conduzidas em diferentes bacias hidrográficas brasileiras demonstram que a distribuição dos metais reflete tanto a litologia regional quanto às transformações decorrentes das atividades humanas, reforçando a importância de estudos que integrem análises geoquímicas e avaliação de potenciais exposições humanas (BRITO, 2022; ALMEIDA *et al.*, 2020; SOUZA *et al.,* 2018).

Inserida nesse cenário, a região do Cariri cearense apresenta particularidades ambientais relevantes, associadas à transição entre ambientes semiáridos, à diversidade geológica vinculada à Chapada do Araripe e à intensificação de atividades agropecuárias, urbanas e industriais ao longo das últimas décadas. A Bacia Hidrográfica do Rio Salgado destaca-se como um dos principais sistemas hidrográficos do sul do Ceará, desempenhando papel estratégico no suporte às atividades econômicas regionais e no uso cotidiano do solo pelas populações locais, o que reforça a importância de investigações ambientais voltadas a esse compartimento (CPRM, 2016; COGERH, 2019; BRITO, 2022).

Estudos desenvolvidos na região do Cariri indicam que os solos associados ao leito do Rio Salgado e às áreas adjacentes apresentam composição mineralógica capaz de influenciar a disponibilidade natural de elementos como ferro, manganês, cromo, níquel e zinco. Ao mesmo tempo, a intensificação das atividades humanas ao longo da bacia pode modificar os padrões geoquímicos naturais, tornando necessária a compreensão detalhada do comportamento desses metais nos solos e de suas possíveis implicações para o ambiente e para a exposição humana (ARAÚJO *et al.,* 2018; SILVA; MELO, 2017; BRITO, 2022).

Inserido nesse contexto metodológico, o Rio Salgado destaca-se como um sistema ambiental estratégico para a avaliação de impactos associados à contaminação por metais traços no semiárido cearense. A bacia apresenta intensa interação entre processos naturais e atividades antrópicas, incluindo agricultura irrigada, pecuária, expansão urbana e lançamento de efluentes domésticos e agrícolas, fatores que influenciam diretamente a dinâmica de transporte, deposição e acumulação de contaminantes nos solos do leito fluvial (COGERH, 2019; BRITO, 2022).

Dessa forma, a análise dos metais presentes nesses solos permite compreender não apenas o estado atual da contaminação, mas também os efeitos cumulativos decorrentes do uso e ocupação do solo ao longo do tempo, uma vez que os solos atuam como compartimentos de registro histórico de aportes antrópicos (ASSINE, 1992; SÁ *et al.,* 2021). Nesse contexto, justifica-se a adoção de abordagens integradas que associam índices geoquímicos e avaliação probabilística de risco à saúde humana, conforme recomendado por diretrizes consolidadas na literatura ambiental (USEPA, 2007; SHETTY *et al.,* 2024).

Objetivos

Objetivo geral

Avaliar os níveis de contaminação por metais traços em solos do Rio Salgado, na região do Cariri cearense, e estimar o risco carcinogênico associado à exposição humana ao solo.

Objetivos específicos

- Determinar as concentrações dos metais Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn em solos do Rio Salgado, utilizando Espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS);
- Realização de revisão bibliográfica sobre os metais analisados na pesquisa, e as principais técnicas empregadas para determinar e quantificar eles;
- Calcular índices geoquímicos de contaminação (Fator de Contaminação – CF, Índice de Geoacumulação – Igeo, e Índice de Carga de Poluição – PLI) para avaliar a severidade da poluição ambiental;
- Estimar o risco carcinogênico por duas vias de exposição dos solos: ingestão oral e exposição dérmica;
- Comparar os resultados obtidos com limites nacionais (CONAMA 420/2009, CETESB) e internacionais (USEPA, OMS).

Objetivos e Questões de Pesquisa

O presente estudo tem como objetivo avaliar os níveis de contaminação dos metais analisados (Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn) foi definida com base em dois critérios: Sua importância ambiental segundo a literatura internacional aplicada a sedimentos contaminados; Sua pertinência à realidade socioeconômica e produtiva da região do Cariri. Diversos estudos mostram que atividades locais funcionam como potenciais fontes desses elementos.

O Cariri abriga um expressivo polo ceramista, as pesquisas de Brito (2022), Araújo *et al.,* (2018) e Silva e Melo (2017) demonstram que as argilas regionais apresentam naturalmente níveis elevados de Cr, Ni e Zn, reforçando a necessidade de monitoramento desses metais. A presença do polo calçadista em Crato e Juazeiro do Norte, cuja cadeia produtiva emprega pigmentos e adesivos contendo Cr, Zn e Pb, foi documentada por Lima e Silva (2016) e Santos *et al.,* (2019) como fonte potencial para solos e águas.

Em relação à galvanoplastia e oficinas metalúrgicas da região, estudos de Souza *et al.*, (2018) e Oliveira *et al.*, (2020) indicam risco de liberação de Cu, Ni, Zn e Cr em efluentes quando não tratados adequadamente. Além disso, os efluentes urbanos do Crajubar são apontados como vetores relevantes de Cu, Zn e Pb, conforme evidenciado por Brito (2022), Almeida *et al.,* (2020) e Silva *et al.,* (2016). No meio rural, a agricultura familiar e a pecuária extensiva utilizam fertilizantes

fosfatados, corretivos e suplementos minerais ricos em Cd, Pb, Cu e Zn, conforme demonstrado por Medeiros *et al.*, (2021), Barbosa *et al.,* (2019) e Maia *et al.,* (2017).

Esses metais também têm contribuição natural associada às formações sedimentares e rochas do Cariri, conforme relatado em estudos geoquímicos regionais (ARAÚJO *et al.*, 2018; BRITO, 2022). Diante dessas evidências, os elementos selecionados refletem tanto as pressões antrópicas quanto o background geológico da região, justificando sua escolha para a avaliação ambiental dos solos do Rio Salgado.

Para tanto, buscou identificar as concentrações desses elementos nos solos, aplicar índices como o Fator de Contaminação (CF), o Índice de Geoacumulação (Igeo) e o Índice de Carga de Poluição (PLI), além de estimar os riscos à saúde por diferentes vias de exposição (ingestão e contato dérmico).

CAPÍTULO-2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Região do Cariri Cearense e Sub-bacia do Rio Salgado: Caracterização Geoambiental e Pressões Antrópicas

A Região do Cariri Cearense, situada no sul do Estado do Ceará, destaca-se por sua relevância geológica, hidrológica e socioeconômica no contexto do Nordeste brasileiro. Inserida na Bacia Sedimentar do Araripe, apresenta formações do Período Cretáceo compostas por arenitos, folhelhos, calcários e argilominerais, características que influenciam diretamente os padrões de retenção, adsorção e mobilidade de elementos metálicos em solos e sedimentos. A presença de fraturas estruturais facilita a recarga do Aquífero Rio da Batateira e de outros sistemas aquíferos locais, contribuindo para a circulação e possível mobilização de contaminantes dissolvidos (COGERH, 2018; CPRM, 2019).

A Sub-bacia do Rio Salgado, principal tributário da margem esquerda do Rio Jaguaribe, abrange aproximadamente 12.400 km² e atravessa municípios como Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha, Missão Velha, Lavras da Mangabeira e Icó. Suas nascentes localizam-se na Chapada do Araripe, em áreas de elevada recarga hídrica e acentuado gradiente altimétrico. No percurso até a confluência com o Jaguaribe, o rio recebe descargas de córregos e riachos que drenam zonas urbanas, agrícolas e industriais, transportando material em suspensão e contaminantes para seus sedimentos (RIBEIRO, 2017; BRITO, 2022).

Nas últimas décadas, o Cariri tem vivenciado rápido crescimento urbano e industrial, especialmente no eixo Crato–Juazeiro–Barbalha (CRAJUBAR). A expansão de atividades como galvanoplastia, curtumes, setor calçadista, cerâmicas e têxteis, associada ao manejo inadequado de efluentes domésticos e industriais, contribui significativamente para a introdução de Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn no ambiente. Resultados obtidos por Costa, Santos e Tavares (2008) e complementados por Alves *et al.*, (2021) demonstram concentrações elevadas desses elementos em solos adjacentes ao Rio Salgado, evidenciando que as pressões antrópicas locais constituem o principal vetor de contaminação.

O uso agrícola das margens do rio com destaque para culturas de milho, feijão, banana, hortaliças e cana-de-açúcar também exerce influência significativa na dinâmica dos metais. Fertilizantes fosfatados e pesticidas frequentemente apresentam teores relevantes de Cd, Cr, Cu e Ni, que podem ser lixiviados para os solos e transportados para os sedimentos fluviais, alterando o estoque geoquímico regional (BRITO, 2022; IBGE, 2024).

Do ponto de vista ambiental, o clima semiárido quente (BSh) da região promove condições de evaporação intensa, grande variabilidade térmica e longos períodos de estiagem. Tais fatores

favorecem a precipitação e concentração de metais nos sedimentos, especialmente durante a retração dos cursos d'água. Durante a estação chuvosa, eventos de cheia mobilizam sedimentos previamente acumulados, redistribuindo espacialmente os contaminantes ao longo da calha fluvial (COGERH, 2018; RIBEIRO, 2017).

Estudos realizados na última década reforçam a necessidade de monitoramento contínuo dos elementos metálicos na região, Brito (2022) observou correlação entre carbono orgânico e retenção de Cu e Zn em sedimentos de microbacias urbanas, enquanto Alves *et al.,* (2021) identificaram concentrações de Pb, Ni e Cr acima dos valores de referência do CONAMA n.º 420/2009 em solos da Sub-bacia do Salgado. Esses achados justificam a relevância de uma abordagem metodológica integrada, combinando técnicas espectrométricas, índices geoquímicos e modelos de risco humano.

A compreensão das particularidades geoambientais do Cariri e da Sub-bacia do Rio Salgado é, portanto, essencial para interpretar os padrões de distribuição dos metais e os riscos associados. A interação entre fatores naturais como litologia, pedogênese e regime hidrológico e fontes antrópicas determina o comportamento geoquímico desses elementos e fundamenta a necessidade de investigações consolidadas, como a desenvolvida nesta dissertação.

2.2 Contaminação por Metais Tóxicos em Solos

A contaminação ambiental por elementos metálicos tóxicos constitui um dos principais desafios globais relacionados à poluição antrópica, devido à persistência desses elementos nos ecossistemas, à toxicidade mesmo em baixas concentrações e ao elevado potencial de bioacumulação e biomagnificação. Diferentemente de compostos orgânicos, metais não sofrem degradação química ou biológica significativa, podendo permanecer no ambiente por décadas (USEPA, 2007; Cocârţă *et al.,* 2016).

Em solos, esses elementos encontram condições propícias para acumulação, atuando como verdadeiros "arquivos ambientais". Processos de adsorção, complexação com matéria orgânica, precipitação com carbonatos e óxidos metálicos e deposição física determinam sua retenção ou mobilidade. Contudo, alterações físico-químicas do meio, como variações de pH, Eh, teor de matéria orgânica e oxigenação, podem remobilizar tais elementos, permitindo que retornem à coluna d'água e entrem na cadeia alimentar (Hatje & Barros, 2020; Bidone & Castilhos, 2018; Souza *et al.,* 2019).

Entre os metais mais relevantes, destacam-se chumbo (Pb), cromo (Cr), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), níquel (Ni), zinco (Zn) e cobre (Cu). Esses elementos podem desencadear efeitos não carcinogênicos como nefrotoxicidade, hepatotoxicidade e neurotoxicidade e também efeitos

carcinogênicos, especialmente quando há exposição crônica (Shetty *et al.*, 2024; Panqing *et al.,* 2023).

A intensificação da urbanização, a expansão industrial e o crescimento do uso de insumos agrícolas têm contribuído para a liberação contínua desses elementos no ambiente. As vias de exposição humana incluem ingestão de água e alimentos contaminados, inalação de partículas e contato dérmico com solos e sedimentos, tornando a avaliação de risco um instrumento essencial para a saúde pública (USEPA, 2007).

2.3 Avanços Metodológicos na Avaliação de Risco e a Relevância

Historicamente, as avaliações de risco ambiental foram conduzidas predominantemente por abordagens determinísticas, nas quais valores médios de concentração de contaminantes e parâmetros fixos de exposição são utilizados para estimar riscos à saúde humana. Embora úteis como ferramenta de triagem, essas abordagens assumem condições homogêneas e não incorporam de forma adequada a variabilidade natural dos dados ambientais nem as incertezas associadas aos processos de exposição, podendo resultar em estimativas superestimadas ou subestimadas dos riscos reais (USEPA, 2007).

Diante dessas limitações, a literatura tem destacado o uso de modelos probabilísticos como alternativa metodológica mais robusta para avaliação de risco, por permitir incorporar variabilidade e incerteza nos parâmetros de entrada (por exemplo, concentrações ambientais, taxas de ingestão, massa corporal e tempo de exposição). Nessa perspectiva, o risco deixa de ser representado por um único valor pontual e passa a ser expresso como uma distribuição de possíveis resultados, mais compatível com a heterogeneidade do ambiente e da população exposta (USEPA, 2007).

Entre as abordagens probabilísticas, a simulação de Monte Carlo é uma das técnicas mais utilizadas em avaliação de risco ambiental e à saúde humana. De forma conceitual, a técnica consiste em realizar milhares de iterações computacionais em que os parâmetros de entrada são amostrados a partir de distribuições estatísticas previamente definidas. Com isso, obtém-se uma distribuição dos indicadores de risco (por exemplo, HQ, HI e CR), permitindo avaliar percentis e cenários de maior exposição, além de reduzir a dependência de escolhas arbitrárias de valores fixos (USEPA, 2007).

Evidências recentes na literatura demonstram que a incorporação de variabilidade e incerteza pode alterar substancialmente a interpretação do risco, especialmente em cenários com exposição crônica e múltiplas vias. (SHETTY *et al.,* 2024) mostram que a aplicação de modelagem probabilística permite identificar padrões de risco mais sensíveis em populações vulneráveis,

destacando que resultados obtidos por métodos probabilísticos podem revelar cenários que não aparecem com a mesma clareza em abordagens determinísticas.

De modo semelhante, (PANQING *et al.,* 2023) aplicaram simulações de Monte Carlo para avaliação de risco associada à exposição a metais, evidenciando como a técnica contribui para identificar contaminantes prioritários e compreender a influência relativa de diferentes parâmetros de exposição na composição do risco. Esse tipo de abordagem fortalece a interpretação ao quantificar incertezas e fornecer resultados mais representativos para apoio à gestão ambiental (PANQING *et al.*, 2023).

Assim, os avanços metodológicos consolidados em guias de referência e em estudos recentes fundamentam a abordagem adotada nesta dissertação, que integra índices geoquímicos, procedimentos analíticos com digestão ácida e determinação instrumental por FAAS, associados à avaliação probabilística de risco à saúde humana. Essa integração metodológica permite tratar a contaminação por metais em solos de forma mais consistente, ao considerar simultaneamente as variações ambientais e populacionais inerentes a sistemas reais (USEPA, 2007; SHETTY *et al.,* 2024; PANQING *et al*., 2023).

2.4 Importância do Rio Salgado para Avaliação Ambiental Regional

O Rio Salgado, localizado na região do Cariri, no sul do Ceará, constitui um dos principais afluentes do Rio Jaguaribe e desempenha papel central no abastecimento hídrico, irrigação agrícola e suporte às atividades pecuárias locais. Inserido em um contexto semiárido, caracteriza-se por apresentar forte sazonalidade hídrica, com períodos de cheias e estiagens que influenciam diretamente na dinâmica de transporte e deposição no solo.

A bacia hidrográfica do Rio Salgado está inserida em uma região marcada pelo uso intensivo do solo, que inclui agricultura irrigada, pecuária e centros urbanos, responsáveis pela geração de efluentes domésticos e agrícolas. Essas pressões antrópicas tornam o rio um sistema altamente vulnerável à contaminação por metais, em especial cromo (Cr) e Níquel (Ni).

O Rio Salgado desempenha papel estratégico no abastecimento hídrico, no desenvolvimento agropecuário e no equilíbrio socioambiental do Cariri cearense. Suas margens e leito funcionam como receptores diretos de escoamento superficial urbano, efluentes domésticos, resíduos industriais e cargas difusas provenientes da agricultura. Os solos desse rio acumulam informações históricas sobre esses aportes, tornando a análise dos metais uma ferramenta poderosa para compreender processos de contaminação e seus possíveis impactos de longo prazo.

Nesse cenário, torna-se evidente que o desenho metodológico adotado na dissertação fundamentado na literatura recente e em modelos robustos de avaliação é mais do que uma escolha

técnica: trata-se de uma estratégia científica crítica para lidar com as complexidades da poluição por metais. A análise probabilística tem sido amplamente empregada em estudos de avaliação de risco ambiental como uma abordagem complementar aos métodos determinísticos tradicionais. Diferentemente das estimativas pontuais, que utilizam valores fixos para os parâmetros de exposição, a análise probabilística permite considerar a variabilidade e a incerteza associadas aos diferentes fatores envolvidos na avaliação de risco, como taxas de ingestão, peso corporal, tempo de exposição e concentração dos contaminantes no ambiente (USEPA, 2014; ATSDR, 2005). Dessa forma, essa abordagem possibilita representar de maneira mais realista as condições de exposição às quais as populações estão submetidas, fornecendo estimativas mais robustas e confiáveis dos potenciais riscos à saúde humana.

Entre as técnicas probabilísticas mais utilizadas em estudos ambientais destaca-se a simulação de Monte Carlo, amplamente aplicada em avaliações de risco associadas à contaminação por metais em solos, sedimentos e águas superficiais. Essa técnica consiste na geração de milhares de interações computacionais nas quais os parâmetros de entrada são representados por distribuições estatísticas, permitindo estimar a probabilidade de ocorrência de diferentes níveis de risco para uma determinada população exposta (WHO, 2010; USEPA, 2014). Estudos recentes demonstram que a aplicação da simulação de Monte Carlo contribui significativamente para reduzir incertezas nas estimativas de risco carcinogênico e não carcinogênico, permitindo identificar cenários de maior vulnerabilidade e subsidiar estratégias de gestão ambiental (Shetty *et al.,* 2024; Panqing *et al.,* 2023).

No contexto de estudos envolvendo contaminação por metais potencialmente tóxicos, a análise probabilística tem se mostrado particularmente útil para avaliar a distribuição dos riscos entre diferentes grupos populacionais. Crianças, adolescentes e adultos podem apresentar probabilidades distintas de exposição e susceptibilidade, de modo que a abordagem probabilística permite estimar intervalos de confiança e percentis de risco associados a cada faixa etária (USEPA, 2007; ATSDR, 2005). Além disso, essa metodologia possibilita identificar quais parâmetros exercem maior influência nos resultados da avaliação de risco, contribuindo para uma compreensão mais detalhada dos processos de exposição humana e para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à proteção da saúde ambiental (WHO, 2010).

Em síntese, a introdução evidencia que a escolha metodológica da dissertação não se restringe à aplicação de técnicas analíticas, mas reflete um posicionamento científico diante dos desafios ambientais contemporâneos. No contexto de avaliar os níveis de contaminação por elementos metálicos traços nos solos do Rio Salgado, na região do Cariri (CE), por meio de digestão ácida e análise instrumental via FAAS, índices geoquímicos, avaliação de risco humano e simulação probabilística, o estudo alinha-se às tendências mais atuais da literatura, representadas

por trabalhos como os de Shetty *et al.*, (2024) e Panqing *et al.,* (2023), e busca contribuir tanto para o avanço do conhecimento acadêmico quanto para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos recursos hídricos e edáficos no semiárido cearense.

2.5 Riscos carcinogênicos

Os riscos carcinogênicos associados à exposição a contaminantes ambientais, como os metais tóxicos, têm sido alvo de crescente preocupação na comunidade científica e nos órgãos reguladores de saúde. Esses riscos referem-se à probabilidade de desenvolvimento de câncer ao longo da vida em indivíduos expostos a determinadas substâncias, considerando fatores como dose, frequência, via de exposição e suscetibilidade individual (USEPA, 2007).

Diferentemente dos efeitos agudos, que se manifestam rapidamente após uma exposição elevada, os riscos carcinogênicos resultam de exposições crônicas e cumulativas, podendo desencadear alterações celulares irreversíveis, mutações genéticas e, em última instância, a formação de tumores malignos (WHO, 2010). A avaliação desse tipo de risco é, portanto, fundamental para a saúde pública, pois permite identificar situações em que populações estão sujeitas a perigos invisíveis e de longo prazo.

A quantificação do risco carcinogênico constitui uma etapa essencial na avaliação da exposição humana a contaminantes ambientais. De forma geral, esse processo combina a concentração do contaminante no meio ambiental (solo, água ou sedimentos) com fatores de exposição — como ingestão, inalação e contato dérmico — além de parâmetros fisiológicos específicos de cada grupo etário. A partir desses elementos, é possível estimar a probabilidade de desenvolvimento de câncer ao longo da vida decorrente de uma exposição contínua (USEPA, 2007; ATSDR, 2005).

Os cálculos seguem metodologias padronizadas por organismos internacionais, que estabelecem valores de referência para interpretação do risco. O intervalo considerado aceitável situa-se entre 10^{-6} e 10^{-4}, representando uma probabilidade adicional de ocorrência de câncer variando entre um caso em um milhão e um caso em dez mil indivíduos expostos (WHO, 2010). Valores abaixo desse intervalo são geralmente considerados desprezíveis, enquanto valores acima indicam a necessidade de maior atenção e possíveis medidas de mitigação.

Outro aspecto importante refere-se à diferença de suscetibilidade entre grupos etários. Crianças, adolescentes e adultos não respondem da mesma forma à exposição a contaminantes ambientais. Crianças, por exemplo, apresentam maior risco relativo devido ao menor peso corporal e maior taxa de ingestão em relação ao peso, enquanto adolescentes e adultos podem acumular efeitos ao longo de períodos mais longos de exposição (Shetty *et al.*, 2024; Panqing et al., 2023).

Por essa razão, estudos ambientais frequentemente estratificam os cálculos de risco por faixa etária, garantindo maior precisão nas estimativas.

Estudos recentes confirmam essa tendência. (Shetty *et al.,* 2024) observaram que, em solos agrícolas submetidos ao uso intensivo de pesticidas e fertilizantes químicos, crianças apresentaram valores de risco carcinogênico superiores ao limite aceitável de 10^{-6}–10^{-4}, enquanto adultos permaneceram em patamares mais baixos. Resultados semelhantes foram relatados por Panqing *et al.*, (2023), que atribuíram a maior suscetibilidade infantil à maior ingestão relativa de partículas contaminadas e ao tempo de exposição acumulativo ao longo da vida.

Estudos conduzidos em diferentes regiões do Brasil apresentam resultados variados dependendo das características ambientais e do grau de pressão antrópica. Em áreas urbanas contaminadas por resíduos industriais e lixões desativados, como observado em estudos realizados em Maceió (AL) e em regiões metropolitanas do Sudeste brasileiro, foram registrados valores de risco carcinogênico próximos ou superiores ao limite aceitável para determinados metais, especialmente cromo, níquel e chumbo (COSTA 2021). Nessas regiões, a proximidade entre áreas residenciais e solos contaminados aumenta significativamente o potencial de exposição humana, sobretudo por meio do contato dérmico e da ingestão acidental de partículas de solo contaminado.

Por outro lado, estudos realizados em ambientes menos industrializados ou com menor intensidade de atividades poluidoras tendem a apresentar valores de risco carcinogênico mais baixos. Pesquisas realizadas em regiões agrícolas da América Latina indicam que, apesar da presença de metais potencialmente tóxicos nos solos, os valores estimados de risco frequentemente permanecem dentro do intervalo considerado aceitável (Emmanuel *et al.,* 2022). Esses resultados sugerem que fatores como origem geológica dos metais, dinâmica geoquímica do solo e intensidade das atividades antrópicas exercem influência significativa sobre o risco ambiental e sanitário.

No contexto do semiárido nordestino, a presença de elementos metálicos nos solos e sedimentos pode estar associada tanto a processos naturais quanto a atividades humanas. A região do Cariri cearense, localizada na porção sul do estado do Ceará e influenciada pela Chapada do Araripe, apresenta características geológicas e pedológicas que favorecem a ocorrência natural de alguns elementos traços. Entretanto, a intensificação das atividades urbanas, industriais e agrícolas nas últimas décadas tem contribuído para o aumento da pressão ambiental sobre os recursos hídricos e os solos da região(SILVA & MELO, 2017).

A sub-bacia do Rio Salgado, uma das principais unidades hidrográficas do sul do Ceará, drena áreas que abrangem importantes centros urbanos, como Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha. Nessas áreas, o crescimento populacional, a expansão urbana e a presença de polos industriais, como o setor calçadista e o polo ceramista regional, podem contribuir para a introdução de metais potencialmente tóxicos no ambiente. Pigmentos, curtentes, adesivos industriais e resíduos

provenientes de atividades metalúrgicas e de galvanoplastia constituem fontes potenciais de elementos como cromo, cobre, zinco e níquel (BRITO, 2022).

Além das fontes industriais, atividades agrícolas também podem contribuir para o aporte de metais no ambiente, principalmente por meio do uso de fertilizantes fosfatados, corretivos de solo e defensivos agrícolas. Esses insumos podem conter impurezas metálicas que, ao longo do tempo, se acumulam nos solos e sedimentos, podendo ser mobilizadas por processos erosivos ou transportadas por sistemas fluviais (ARAÚJO *et al.*, 2018).

No caso específico da região do Cariri, os solos associados ao leito e às margens do Rio Salgado desempenham papel fundamental na retenção e no transporte de contaminantes. Esses ambientes atuam como compartimentos geoquímicos capazes de acumular elementos metálicos ao longo do tempo, funcionando como registros da história de uso e ocupação da bacia hidrográfica (OLIVEIRA,2023; SANTOS *et al.,* 2019). A mobilidade desses elementos pode variar de acordo com fatores como pH do solo, teor de matéria orgânica, condições redox e granulometria dos sedimentos.

Embora ainda existam poucos estudos que avaliem diretamente o risco carcinogênico associado à presença de metais em solos da sub-bacia do Rio Salgado, investigações realizadas em outras regiões brasileiras como a de (BARBOSA, 2024; RAMIRES, 2021) demonstram que a avaliação integrada entre concentrações ambientais e parâmetros de exposição humana é fundamental para compreender os potenciais impactos à saúde. Estudos conduzidos em áreas contaminadas por resíduos urbanos e industriais demonstram que, mesmo quando as concentrações de metais não ultrapassam limites legais estabelecidos por normas ambientais, a exposição prolongada pode representar riscos relevantes para determinados grupos populacionais.

No contexto do Cariri cearense, dados epidemiológicos indicam crescimento progressivo na incidência de câncer na macrorregião de saúde ao longo da última década. Informações divulgadas pelo Instituto Nacional do Câncer apontam aumento no número de casos registrados em municípios da região, particularmente em Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha (INCA, 2023). Esses municípios concentram a maior estrutura de atendimento oncológico do interior do Ceará, incluindo o Hospital Regional do Cariri e o Hospital São Vicente de Paulo, que atuam como centros de referência para diagnóstico e tratamento.

Relatórios da Secretaria da Saúde do Estado do Ceará indicam que a demanda por atendimento oncológico na região tem aumentado gradualmente, refletindo tanto o crescimento populacional quanto a melhoria na capacidade de diagnóstico e registro dos casos (SESA-CE, 2022). Embora esses dados não estabeleçam uma relação causal direta entre contaminação ambiental e incidência de câncer, eles reforçam a importância de investigar possíveis fatores ambientais que possam influenciar a saúde da população.

Dessa forma, a avaliação de risco carcinogênico em ambientes associados ao sistema hidrográfico do Rio Salgado torna-se uma ferramenta importante para compreender os potenciais impactos da contaminação por metais traços. A integração entre dados geoquímicos, parâmetros de exposição humana e informações epidemiológicas regionais contribui para uma análise mais abrangente da qualidade ambiental e dos riscos associados à ocupação e ao uso do solo na região do Cariri cearense.

Quadro 1 - Estudos correlatos sobre avaliação de risco carcinogênico associados a metais em solos.

Autor (ano)	**Região**	**Tipo de solo**	**Metais Avaliados**	**Faixa etária**	**Via de exposição**	**Intervalo de Risco**	**Observação principal**
Shetty *et al.*, (2024)	Índia	Agrícola	Cr, Ni, Zn	Crianças/ adultos	Ingestão	$>10^{-4}$	Risco elevado para crianças
Panqing *et al.,* (2023)	China	Urbano	Cr, Cu, Ni	Crianças/ adultos	Ingestão	10^{-6} – 10^{-4}	Maior susceptibilidade infantil
Emmanul *et al.,* (2022)	América Latina	Periurbana	Cr, Zn	Crianças/ adultos	Ingestão	$>10^{-6}$	Risco insignificante
Ferreira *et al.*, (2019)	Brasil/ Minas Gerais	Solos Urbanos	Cr, Ni, Pb, Zn	Criança	Ingestão/ dérmica	10^{-6} – 10^{-4}	Risco moderado para crianças
Li *et al.,* (2014)	China	Solos Urbanos	Cr, Pb, Zn, Cu	Crianças/ Adultos	Ingestão	$>10^{-5}$	Crianças mais vulneráveis
Wei & Yang (2010)	China	Solos Urbanos	Cr, Cu, Ni, Zn	Crianças/ Adultos	Ingestão	10^{-6} – 10^{-4}	Crianças mais vulneráveis
Marrugo-Negrete *et al.,* (2017)	Colômbia	Fluvial	Cr, Ni, Cu	Crianças/ Adultos	Ingestão	10^{-6}	Risco baixo

Este estudo	Brasil/ Região do Cariri-Ce	Leito fluvial	Cr, Cu, Co Ni, Zn, Fe e Mn	Crianças/ adolescente / adultos	Ingestão/ dérmica	10^{-6} – 10^{-4}	Risco moderado

CAPÍTULO - 3 PRODUÇÃO CIENTÍFICA.

A produção é composta por um artigo de revisão já submetido e aprovado (Artigo 1), e por um artigo experimental que sistematiza os resultados obtidos no presente trabalho (manuscrito em conclusão).

Artigo 1 – Remediação de solos contaminados por metais tóxicos: uma revisão sobre fontes, impactos e técnicas analíticas. (ANEXO 2).

Brazilian Journal of Development | 1
ISSN: 2525-8761

Remediation of soils contaminated by toxic metals: a review of sources, impacts and analytical techniques

Remediação de solos contaminados por metais tóxicos: uma revisão sobre fontes, impactos e técnicas analíticas

Remediación de suelos contaminados por metales tóxicos: una revisión de fuentes, impactos y técnicas analíticas

DOI:10.34117/bjdv11n7-014

Submitted: Jun 2nd, 2025
Approved: Jun 24th, 2025

Ligia Maria da Silva
Graduated in Chemistry
Instituição: Universidade Regional do Cariri
Endereço: Crato, Ceará, Brasil
E-mail: ligia.silva@urca.br

Maria Luana Alves da Silva
Graduating in Mechanical Production Engineering
Instituição: Universidade Regional do Cariri
Endereço: Crato, Ceará, Brasil
E-mail: luana.alvess@urca.br

Álvaro Santos Silva
Graduated in Chemistry
Instituição: Universidade Regional do Cariri
Endereço: Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil
E-mail: alvaro.santos@urca.br

Francisco Alixandre Ávila Rodrigues
PhD in Teleinformatics Engineering
Instituição: Universidade Federal do Cariri
Endereço: Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil
E-mail: alixandre.avila@ufca.edu.br

Ligia Cláudia Castro de Oliveira
PhD in Analytical Chemistry
Instituição: Universidade Regional do Cariri
Endereço: Crato, Ceará, Brasil
E-mail: ligia.castro@urca.br

ABSTRACT
The contamination of soils and sediments by toxic metallic elements, such as lead, cadmium, mercury, chromium, and arsenic, constitutes a persistent environmental problem, intensified by industrial, agricultural, and mining activities. These elements, due to their toxicity, persistence, and bioaccumulation capacity, pose direct risks to human

CAPÍTULO - 4

4. MATERIAS E MÉTODOS

4.1 Mapa/Pontos de Coleta

Os pontos de coleta S1 (Sítio Batateiras), S2 (Lagoa de Estabilização de Juazeiro do Norte), S3 (Rio Carás) e S4 (Riacho dos Macacos) essa distribuição espacial permitiu capturar um panorama representativo da qualidade dos solos da bacia, possibilitando não apenas a avaliação das concentrações de metais, mas também a identificação de padrões espaciais de acúmulo. Os quatro pontos, representados na (Figura 2), foram selecionados ao longo do Rio Salgado de modo a contemplar setores submetidos a diferentes pressões ambientais e potenciais fontes pontuais e difusas de poluição, garantindo a heterogeneidade necessária para a interpretação geoquímica da área estudada.

A coleta das amostras foi realizada no segundo semestre de 2024, entre os meses de setembro a novembro, período caracterizado por baixa pluviosidade na região, o que favorece o acesso aos pontos e a representatividade das amostras superficiais. Todas as amostras foram obtidas na camada superficial do solo, com aproximadamente 15 centímetros de profundidade, adotando um procedimento padronizado para garantir comparabilidade entre os locais. Para a extração dos testemunhos (Figura 1), utilizou-se um tubo de PVC introduzido manualmente nos quatro pontos de coleta, o que permitiu recuperar colunas de solo minimamente perturbadas e adequadas para análises físicas e químicas subsequentes.

Figura 1 -Testemunhos dos quatro pontos de coleta.



Sitio Batateiras.



Lagoa de Estabilização.



Carás.

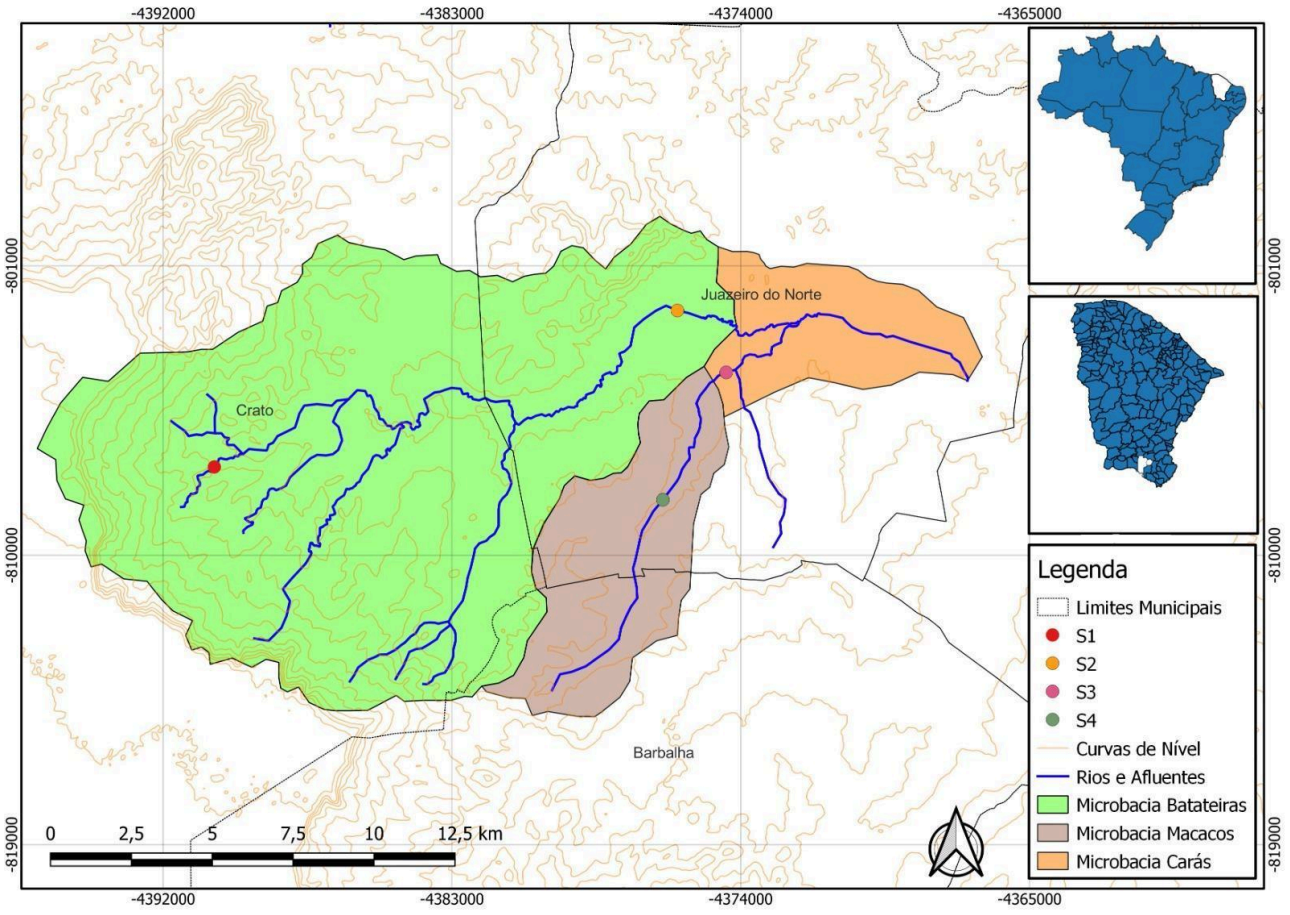


Riacho dos Macacos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O conjunto de amostras obtido nos pontos S1 a S4 constituiu a base material para a caracterização geoquímica dos solos, avaliação dos índices de contaminação e cálculo dos riscos carcinogênicos. Cada ponto funcionou como um recorte ambiental específico, permitindo observar padrões entre os diferentes setores da bacia, contribuindo para a identificação das dinâmicas locais de entrada, transporte e acúmulo de metais tóxicos.

Figura 2 - Mapa dos pontos de coleta



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2 Tratamento das amostras

A coleta de amostras foi realizada em quatro pontos ao longo do leito do Rio Salgado, na região do Cariri (CE), considerando-se critérios como acessibilidade, gradação de influência antrópica e características geomorfológicas específicas da área. As análises de metais foram realizadas na fração total das amostras de solo, obtida após secagem, homogeneização e digestão ácida. Embora estudos geoquímicos frequentemente priorizem a fração fina (silte + argila), devido à maior capacidade dessas partículas de adsorver e reter metais traço, a avaliação da fração total

permite estimar de forma mais abrangente a carga metálica presente no material sedimentar e no solo analisado (FADIGAS *et al.,* 2006; OLIVEIRA, 2012; SOUZA *et al.*, 2015).

Após a retirada dos testemunhos do solo, cada amostra foi imediatamente acondicionada sob refrigeração em caixa térmica e transportada em condições controladas até o Laboratório de Estudos em Química Biológica e Ambiental (LEQBA), da Universidade Regional do Cariri (URCA), onde ocorreu o primeiro tratamento laboratorial.

No LEQBA, os testemunhos foram devidamente armazenados para que posteriormente fossem abertos. As amostras foram submetidas à secagem em estufa a 100 °C, organizada em quatro bateladas, de maneira a garantir uniformidade no processo e evitar variações térmicas entre os conjuntos, após a secagem das amostra foi realizado a peneiração e a homogeneização das amostra para que pudesse realizar o quarteamento de cada batelada. As frações peneiradas com malha de 2 mm, foram armazenadas em sacos plásticos, devidamente etiquetados conforme o ponto de coleta, e mantidas protegidas da umidade até a etapa analítica.

A partir do material obtido pelo quarteamento, foi retirada uma fração representativa, da qual foram pesadas alíquotas de $\pm$ 0,0001g de solo, em duplicata, para cada ponto de coleta. Após a pesagem de todas as amostras foram armazenadas em sacos plásticos devidamente identificados para que posteriormente fossem submetidas à digestão ácida.

A digestão ácida das amostras e as determinações instrumentais subsequentes foram realizadas na Central Analítica da Universidade Federal do Cariri (UFCA), seguindo procedimentos padronizados descritos por (AGUIAR, 2007). As análises foram conduzidas por espectrometria de absorção atômica com chama (FAAS), assegurando precisão e reprodutibilidade na quantificação dos elementos analisados.

Para a digestão ácida parcial, aproximadamente 1,0 g de solo foi transferido para frascos do tipo Erlenmeyer, aos quais foram adicionados 25 mL de solução de água régia a 50% (4 H_2O : 3 HCl : 1 HNO_3) (AGUIAR, 2007). Em seguida, os frascos foram acoplados a condensadores do tipo "dedo frio", com o objetivo de minimizar perdas por volatilização. O sistema foi submetido a aquecimento em banho-maria a 80 °C por aproximadamente 2 horas, promovendo a solubilização dos metais cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), manganês (Mn), cobalto (Co), cádmio (Cd), zinco (Zn) e ferro (Fe).

Após o término da digestão, os líquidos dos Erlenmeyer foram transferidos para tubos Falcon estéreis e identificados e posteriormente centrifugados por 10 min a 4000 RPM para acelerar a decantação dos resíduos remanescentes. Essa etapa garantiu a separação da fração líquida contendo os elementos metálicos solubilizados.

Finalizado o preparo das amostras em duplicata, as leituras foram realizadas na Central Analítica da Universidade Federal do Cariri (UFCA), por FAAS modelo SpectrAA 50B da Varian,

a leitura foi feita conforme os parâmetros otimizados para os elementos traços selecionados no estudo.

4.3 Espectrometria de Absorção Atômica de Chama (FAAS)

A escolha pela FAAS justifica-se não apenas pela robustez da técnica, mas também pela sua ampla aceitação em protocolos internacionais de monitoramento ambiental (USEPA, 2007; Panqing *et al.*, 2023). Pois, trata-se de uma técnica consolidada na literatura para a análise de metais traços em matrizes ambientais, devido à sua elevada sensibilidade, especificidade e confiabilidade, mesmo em níveis de concentração relativamente baixos (Sánchez-Rodas *et al.*, 2022; Shetty *et al*., 2024).

A técnica de FAAS foi empregada para a determinação das concentrações de Cobre (Cu), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) no solos do Rio Salgado. Os extratos provenientes das amostras foram submetidos à análise em um espectrômetro de absorção atômica equipado com lâmpadas de cátodo oco específicas para cada elemento.

O desempenho analítico do método foi avaliado por meio das principais figuras de mérito, incluindo linearidade, limite de detecção (LOD), limite de quantificação (LOQ) e precisão analítica. As curvas analíticas foram construídas a partir de soluções padrão dos elementos metálicos em diferentes concentrações, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99, indicando boa correlação entre a absorbância e a concentração dos analitos.

Quadro 2 - Figuras de mérito do método analítico por FAAS.

Elemento	R^2	LOD (mg Kg-1)	LOQ (mg Kg-1)
Cu	0,999	0,02	0,07
Cr	0,998	0,03	0,10
Ni	0,999	0,02	0,08
Mn	0,997	0,01	0,05
Zn	0,999	0,01	0,04
Fe	0,998	0,05	0,15

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para todos os elementos analisados foram superiores a 0,99, indicando adequada linearidade do método analítico. Os valores de limite de detecção (LOD) e limite de quantificação (LOQ) demonstram que a técnica de espectrometria de absorção atômica em chama apresenta sensibilidade suficiente para a determinação de metais traço

em matrizes ambientais, como solos e sedimentos, sendo amplamente utilizada em estudos de monitoramento ambiental (RIBANI *et al.,* 2004; SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2014; WELZ; SPERLING, 2019).

A escolha dos parâmetros instrumentais incluindo comprimento de onda, largura de fenda, tipo de chama e corrente aplicada às lâmpadas fundamentou-se na literatura técnica e em recomendações do fabricante, visando maximizar sensibilidade, precisão e seletividade. Assim, foram selecionados os comprimentos de onda de 324,7 nm para cobre (Cu), 357,9 nm para cromo (Cr), 240,7 nm para cobalto (Co), 248,3 nm para ferro (Fe), 232,0 nm para níquel (Ni), 279,5 nm para manganês (Mn) e 213,9 nm para zinco (Zn) , em função dos elevados coeficientes de absorção nessas linhas espectrais, garantindo menor interferência espectral e melhor relação sinal-ruído.

Do mesmo modo, a chama ar-acetileno foi adotada por fornecer temperatura adequada para utilização eficiente desses metais, mantendo boa estabilidade do sinal analítico. Esse conjunto de parâmetros assegurou desempenho confiável nas quantificações, em consonância com protocolos amplamente consolidados na literatura para a determinação de elementos traço em matrizes ambientais.(Skoog *et al.,* 2021; Bacon, J.R. *et al.,* 2024).

Foram preparadas curvas de calibração várias monoelementares com pelo menos cinco pontos de concentração crescente, utilizando soluções-padrão certificadas pelo NIST. O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi superior a 0,995 para ambos os metais, assegurando a linearidade adequada do método. Além disso, foram analisados brancos e duplicatas de amostras, de modo a monitorar a precisão e descartar possíveis interferências instrumentais.

As leituras foram realizadas em duplicata para cada amostra, minimizando variações instrumentais e aumentando a confiabilidade estatística. A conversão dos valores de absorbância em concentrações foi realizada a partir das equações das curvas de calibração, assegurando consistência entre os dados obtidos.

4.4 Risco Ambiental

Para além da quantificação direta das concentrações metálicas, a interpretação de seus impactos ambientais requer a aplicação de ferramentas geoquímicas consolidadas. Nesse sentido, optou-se pelo uso de índices internacionalmente reconhecidos que permitem não apenas identificar a intensidade da contaminação, mas também compará-la com valores de referência globais e nacionais, contextualizando os resultados obtidos no Rio Salgado. Tais ferramentas se baseiam em parâmetros matemáticos capazes de traduzir concentrações absolutas em indicadores de qualidade

ambiental, possibilitando uma visão mais clara sobre o grau de poluição, a intensidade da pressão antrópica e o risco associado.

O Índice de Geoacumulação (Igeo), originalmente proposto por Müller (1969) e amplamente utilizado em pesquisas recentes (Gopal *et al.*, 2025), fornece um meio de comparar concentrações medidas com valores de fundo (Bn), ajustados por um fator de correção para variabilidade natural. Esse índice permite classificar o solo e/ou sedimento em categorias que variam desde ambientes não contaminados até extremamente poluídos, oferecendo, portanto, uma primeira visão sobre a magnitude da contaminação.

$$I_{geo} = log_2\left[\frac{C_{y(sediment)}}{1.5 \times C_{y(reference)}}\right] \quad (1)$$

De forma complementar, o Fator de Contaminação (CF) expressa diretamente a razão entre a concentração medida e o valor de referência (CETESB), sendo particularmente útil para identificar quais metais atuam como principais elementos traços de preocupação ambiental (Shetty *et al.*, 2024).

$$CF = \frac{C_{y\,(sediment)}}{C_{y(reference)}} \quad (2)$$

Já o Índice de Carga Poluente (PLI) sintetiza o efeito combinado de múltiplos metais, fornecendo uma visão integrada da qualidade ambiental da área estudada. Ao reunir em um único parâmetro a contribuição relativa de cada metal, esse índice permite avaliar o estado geral de poluição, estabelecendo comparações com outros ecossistemas e subsidiando decisões de gestão ambiental (Afifudin *et al.*, 2025).

$$PLI = \sqrt{CF_{Cr} \times CF_{Ni}} \quad (3)$$

Assim, os cálculos apresentados, não têm apenas função descritiva, mas representam uma estratégia metodológica que busca traduzir dados numéricos em evidências científicas robustas, capazes de fundamentar a discussão sobre os riscos carcinogênicos associados à exposição humana aos solos e/ou sedimentos do Rio Salgado. A Quadro 6 fornece a classificação de status dos índices I_{geo}, PLI e CF.

Quadro 3 - Classificação dos valores de I_{geo}, PLI e CF.

Valores de PLI	**Status**
$PLI \leq 1$	Sem poluição metálica
$PLI > 1$	Existe poluição por metais
Valores de I_{geo}	**Status**
$I_{geo} > 5$	Muito fortemente poluídas
$4 < I_{geo} \leq 5$	Fortemente a muito fortemente poluídas
$3 < I_{geo} \leq 4$	Fortemente poluído
$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderadamente a fortemente poluído
$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente poluído
$0 < I_{geo} \leq 1$	Não poluído a moderadamente poluído
≤ 0	Praticamente não poluído
Valores de CF	**Status**
$CF < 1$	Baixa contaminação
$1 \leq CF < 3$	Contaminação moderada
$3 \leq CF < 6$	Contaminação considerável
$CF > 6$	Contaminação muito alta

Fonte: (Panqing *et al,* 2023; Shetty *et al.,* 2024).

4.5 Avaliação de Risco à Saúde Humana

No contexto desse trabalho, a avaliação de risco à saúde humana é um processo que estima a gravidade de efeitos adversos à saúde decorrentes da exposição a substâncias químicas, como poluentes ambientais. Para avaliar os riscos à saúde representados pelos metais traços no solo, a população foi dividida em três grupos: adultos, adolescentes e crianças. Nessa seção, é mostrada todas as formulações matemáticas para determinar o risco carcinogênico por ingestão e exposição dérmica aos solos e sedimentos investigados.

4.5.1. Exposição por ingestão

A ingestão de solo contaminado é uma via de exposição fundamental para metais traços, os riscos à saúde associados a esta via são avaliados calculando a DI através da ingestão do solo, a qual pode se dar por meio do consumo, por exemplo de legumes e verduras (Panqing *et al.*, 2023; Shetty *et al.*, 2024) usando a Equação 1:

$$DI_{ing} = \frac{C_s \times IR_{ing} \times EF \times ED}{BW \times AT} 10^{-6} \quad (1)$$

Onde, Cs: concentração medida de metais traço no solo (mg/kg); I_{Ring}: Taxa de Ingestão do solo (mg/dia); EF: frequência de exposição (dias/ano); ED: duração da exposição (anos); BW: peso corporal (kg); AT: tempo médio de exposição (dias); DI_{ing} é medido em mg/kg/dia. Os valores usados para os cálculos de DI_{ing} estão listados na Tabela 1.

Quadro 4 - Valores padrão utilizados para estimativa da ingestão diária por via oral

	Adultos	**Adolescentes**	**Crianças**
IR_{ing}	100	150	200
ED	35	15	3
EF	365	365	365
BW	70	35	15
AT	$EF \times 365$	$EF \times 365$	$EF \times 365$

Fonte: (Shetty *et al.,* 2024).

Esses parâmetros permitem estimar a dose diária potencial de exposição considerando diferentes faixas etárias, incluindo crianças, adolescentes e adultos, foram definidos de acordo com recomendações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2007; USEPA, 2014) que são amplamente utilizados em estudos de avaliação de risco associados à presença de metais em solos contaminados (Shetty *et al.*, 2024; Panqing *et al.,* 2023).

Os parâmetros adotados representam valores médios populacionais e podem variar de acordo com fatores socioeconômicos, hábitos alimentares, características climáticas e padrões de uso do solo específicos de cada região. Além disso, a variabilidade individual relacionada à taxa de ingestão de solo, peso corporal e tempo de exposição pode influenciar significativamente os resultados obtidos. Dessa forma, os valores estimados devem ser interpretados como aproximações do risco potencial, sendo recomendada a utilização de abordagens probabilísticas, para reduzir as incertezas associadas às estimativas determinísticas de risco (USEPA, 2014; WHO, 2010; Shetty *et al.,* 2024).

A ingestão de solo contaminado representa uma das principais vias de exposição humana a metais traço, especialmente em áreas agrícolas e periurbanas, onde partículas do solo podem ser incorporadas ao organismo por ingestão direta ou indireta por meio do consumo de alimentos cultivados em solos contaminados (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011).

4.5.2. Exposição dérmica

A exposição dérmica é tida como a contaminação absorvida pela pele (Panqing *et al.*, 2023). Essa via é particularmente relevante para indivíduos que entram em contato direto com solo poluído (Shetty et al., 2024). Assim, a ingestão diária por absorção dérmica é um fator relevante a ser considerado e pode ser calculada como (Panqing *et al.*, 2023; Shetty *et al*., 2024):

$$DI_{dermal} = \frac{C_s \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} 10^{-6} \quad (2)$$

onde, Cs: concentração medida de metais no solo (mg/kg); SA: Área de superfície da pele exposta (cm²); AF: Fator de aderência (mg/cm² para solo); ABS: Fator de absorção dérmica; EF: Frequência de exposição (dias/ano); ED: Duração da exposição (anos); BW: Peso corporal (kg); AT: Tempo médio (dias); DI_{dermal} é medido em mg/kg/dia. Os valores usados para os cálculos DI_{dermal} estão listados na Tabela 2.

Quadro 5 - Valores padrão utilizados para estimativa da ingestão diária via absorção dérmica.

	Adultos	**Adolescentes**	**Crianças**
SA	6600	5000	2800
AF	0.07	0.07	0.2
ABS	365	365	365
BW	70	35	15
EF	365	365	365
AT	$EF \times 365$	$EF \times 365$	$EF \times 365$

Fonte:(Panqing *et al,* 2023; Shetty *et al.*, 2024).

A estimativa da ingestão diária por absorção dérmica apresenta fontes de incerteza associadas principalmente à variabilidade na concentração de metais no solo, à heterogeneidade ambiental das áreas amostradas e aos parâmetros de exposição utilizados no modelo, como área de pele exposta, fator de aderência do solo, frequência e duração da exposição. Além disso, fatores fisiológicos individuais, como peso corporal e eficiência de absorção dérmica, podem influenciar os resultados. Dessa forma, os valores obtidos representam estimativas baseadas em parâmetros padronizados amplamente utilizados em avaliações de risco ambiental (USEPA, 2004; USEPA, 2011).

4.5.3. Risco Carcinogênico (CR)

Os RC para a saúde decorrentes do contato dérmico e da ingestão oral, para cada metal traço, foram calculados usando a Equação (3) (Panqing *et al.,* 2023; Shetty *et al*., 2024):

$$CR = DI \times CSF \quad (3)$$

onde DI é a ingestão diária por ingestão oral/contato dérmico e CSF é o fator de inclinação de conversão dos metais traços (ver Tabela 3). Conforme referência regulatória (USEPA,2007), quando o CR é menor que 1×10^{-6}, o risco de desenvolver câncer é pequeno e pode ser desconsiderado. No entanto, se o CR for maior que 1×10^{-4} a chance de desenvolvimento de câncer ao longo da vida não deve ser desconsiderada.

Segundo a USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), o CSF (*Cancer Slope Factor*) é um parâmetro toxicológico utilizado na avaliação de risco carcinogênico. O CSF representa a inclinação da curva dose-resposta para efeitos cancerígenos, expressando a estimativa

do aumento da probabilidade de ocorrência de câncer em humanos por unidade de dose de exposição ao contaminante (geralmente em mg/kg.dia^{-1}).

O *Cancer Slope Factor* (CSF), definido pela USEPA, quantifica o aumento da probabilidade de ocorrência de câncer associado à exposição a um contaminante ao longo da vida. Expresso em (mg/kg·dia)$^{-1}$, o CSF é utilizado no cálculo do risco carcinogênico (CR) ao ser multiplicado pela dose estimada de exposição (Intake), permitindo estimar a probabilidade de desenvolvimento de câncer por substâncias químicas específicas.

4.5.4. Risco Carcinogênico Total (TCR)

O risco carcinogênico total é a soma dos riscos individuais da exposição de cada metal traço, que foi usado para os metais Cr e Ni. A expressão matemática para o TCR é dada por (Panqing *et al.,* 2023; Shetty *et al*., 2024):

$$TCR = CR_{Cr} + CR_{Ni} \quad (4)$$

A partir da Equação (3), podemos reescrever a equação (4) como,

$$TCR = DI_{Cr} \times CSF_{Cr} + DI_{Ni} \times CSF_{Ni} \quad (5)$$

Quadro 6: Valores do fator de inclinação de conversão (CSF) para metais-traço no solo por diferentes vias de exposição.

Metais traço	CSF_{ing}	CSF_{dermal}	Referências
Cr	0.5	20	(Panqing *et al,* 2023)
Ni	0.84	0.84	(Shetty *et al.,* 2024)

Fonte: (Panqing *et al,* 2023) e (Shetty *et al.,* 2024)

Conforme referência regulatória (USEPA,2007), quando o TCR é menor que 1×10^{-6}, o risco de desenvolver câncer é pequeno e pode ser desconsiderado. No entanto, se o TCR for maior que 1×10^{-4} a chance de desenvolvimento de câncer ao longo da vida não deve ser desconsiderada.

CAPÍTULO- 5

5. Resultados e Discussão

5.1 Concentrações dos metais nos solos da sub-bacia do Rio Salgado

Nesta seção, apresentam-se as evidências obtidas a partir da quantificação dos metais traço cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn) nos solos do leito do Rio Salgado aqui investigados. As concentrações dos metais determinadas nas amostras de solo coletadas nos diferentes pontos da sub-bacia do Rio Salgado apresentaram variações espaciais significativas, refletindo tanto fatores naturais associados à geologia e aos processos de intemperismo quanto possíveis contribuições antrópicas decorrentes do uso e ocupação do solo.

Estudos realizados em bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro indicam que a distribuição de metais em solos e sedimentos é influenciada por características litológicas, processos geomorfológicos e atividades humanas desenvolvidas nas áreas de drenagem (SANTOS; MARINS; ALVES, 2023; MORAIS *et al.,* 2024).

Além disso, a dinâmica geoquímica dos metais no solo está relacionada a propriedades físico-químicas da matriz edáfica, como granulometria, teor de matéria orgânica, pH e presença de óxidos de ferro e manganês. Esses componentes atuam na adsorção e retenção de elementos potencialmente tóxicos, influenciando sua mobilidade e disponibilidade no ambiente (MARTINS, 2024; CARDOSO *et al.*, 2023).

Primeiramente, os resultados foram avaliados conforme os critérios do Atlas Geoquímico de 2016 do estado do Ceará que estabelece valores orientadores de qualidade do solo. O CONAMA também foi utilizado, contudo, a legislação fornece apenas limites de prevenção, deixando os valores de referência de qualidade para serem definidos individualmente por cada estado. Já em relação às avaliações de riscos carcinogênicos de contato dérmico e ingestão, foram consideradas legislações internacionais (USEPA, 2007).

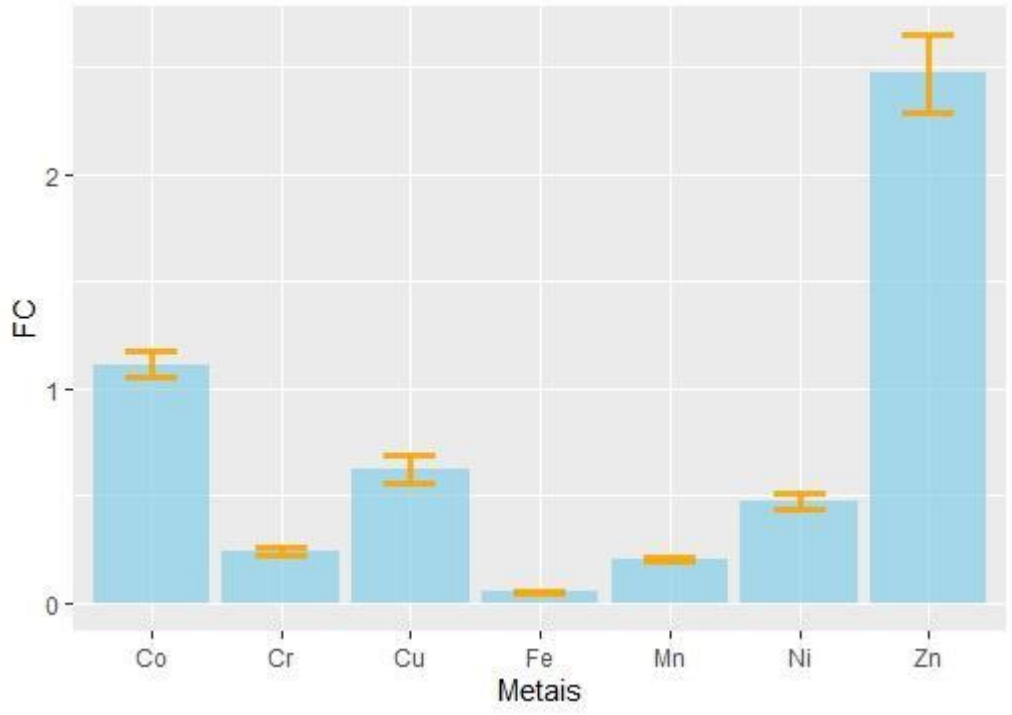


Figura 3- (FC) Fator de contaminação para o Sítio Batateiras (S1).

A Figura 3 ilustra a distribuição das concentrações dos metais utilizados para o cálculo do fator de contaminação (FC) no primeiro ponto de coleta (S1), localizado no município do Crato, Ceará. Esse ponto foi selecionado em uma área relativamente afastada da zona urbana, caracterizada por atividades agropecuárias e presença de algumas indústrias regionais, como fábricas de calçados e cerâmicas. Apesar de ter sido inicialmente considerado um ponto de referência de fundo, os resultados indicaram a presença de metais como Zn, Co, Cu e Ni. A ocorrência desses elementos pode estar associada tanto à contribuição natural proveniente do material de origem do solo quanto à influência de atividades antrópicas desenvolvidas na região. Estudos realizados em bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro indicam que áreas com atividades industriais e agropecuárias podem apresentar enriquecimento de metais como Zn, Cu e Ni nos solos e sedimentos, devido ao uso de insumos agrícolas e à emissão de resíduos industriais (CORRÊA *et al*., 2024; VASCONCELOS *et al.*, 2024).

Entretanto, não se pode descartar a contribuição das atividades agropecuárias locais, uma vez que o Zn é amplamente utilizado como micronutriente em fertilizantes e suplementos minerais empregados na alimentação animal. A aplicação contínua desses insumos pode favorecer o acúmulo gradual de metais no solo ao longo do tempo. Em regiões semiáridas do Brasil, diversos estudos têm demonstrado que práticas agrícolas podem contribuir para o enriquecimento de metais traço em

solos agrícolas, principalmente Zn, Cu e Mn, elementos frequentemente presentes em fertilizantes e corretivos agrícolas (VASCONCELOS *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2025).

Adicionalmente, fatores hidrodinâmicos e a proximidade da zona urbana podem favorecer o transporte e a redistribuição desses metais ao longo do sistema fluvial. O escoamento superficial, especialmente durante períodos chuvosos, pode mobilizar partículas do solo e transportar metais associados a sedimentos finos para os corpos d'água, contribuindo para sua deposição em áreas de menor energia hidráulica (SALOMONS; FÖRSTNER, 1984; CORRÊA *et al.,* 2024).

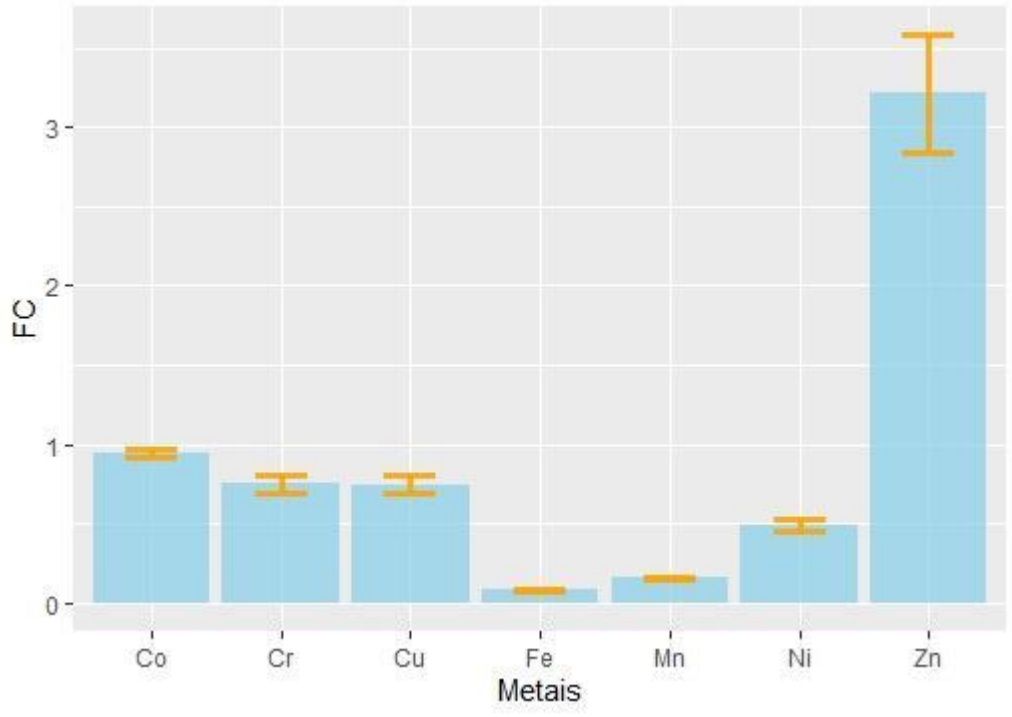


Figura 4- (FC) Fator de contaminação para Lagoa de estabilização.

A Figura 4 apresenta a distribuição dos metais Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn no ponto de coleta S2, localizado em uma lagoa de estabilização no município de Juazeiro do Norte. Embora o ponto esteja relativamente afastado do centro urbano, ele recebe influência indireta do escoamento superficial proveniente da zona urbana e do transporte de contaminantes ao longo do leito do Rio Salgado. Observa-se que os metais Co, Cr, Cu e Zn apresentam maiores concentrações relativas nesse ponto, o que pode estar relacionado às características ambientais da área, que apresenta baixa energia hidrodinâmica e elevada retenção de matéria orgânica. Esses ambientes favorecem a adsorção e complexação de metais na matriz sedimentar, principalmente em associação com óxidos de ferro e manganês (CORRÊA *et al*., 2024; MARTINS, 2024).

A presença significativa de Fe e Mn sugere a atuação de processos geoquímicos relacionados à precipitação e dissolução desses óxidos, que desempenham papel importante no controle da mobilidade de metais no ambiente aquático. Em ambientes aquáticos e sedimentos de lagoas de estabilização, variações nas condições redox podem favorecer a liberação secundária de metais previamente adsorvidos a essas fases minerais (MARTINS, 2024; SILVA *et al.*, 2025)

Além disso, embora o ponto S2 esteja afastado do núcleo urbano imediato, o transporte de contaminantes ao longo do leito do Rio Salgado e a contribuição de áreas industriais a montante, como fábricas de calçados e cerâmicas, reforçam o caráter multifatorial das fontes de contaminação observadas. Assim, a distribuição dos metais neste ponto reflete não apenas a influência antrópica direta, mas também processos geoquímicos naturais que controlam a retenção e redistribuição dos elementos no ambiente aquático.

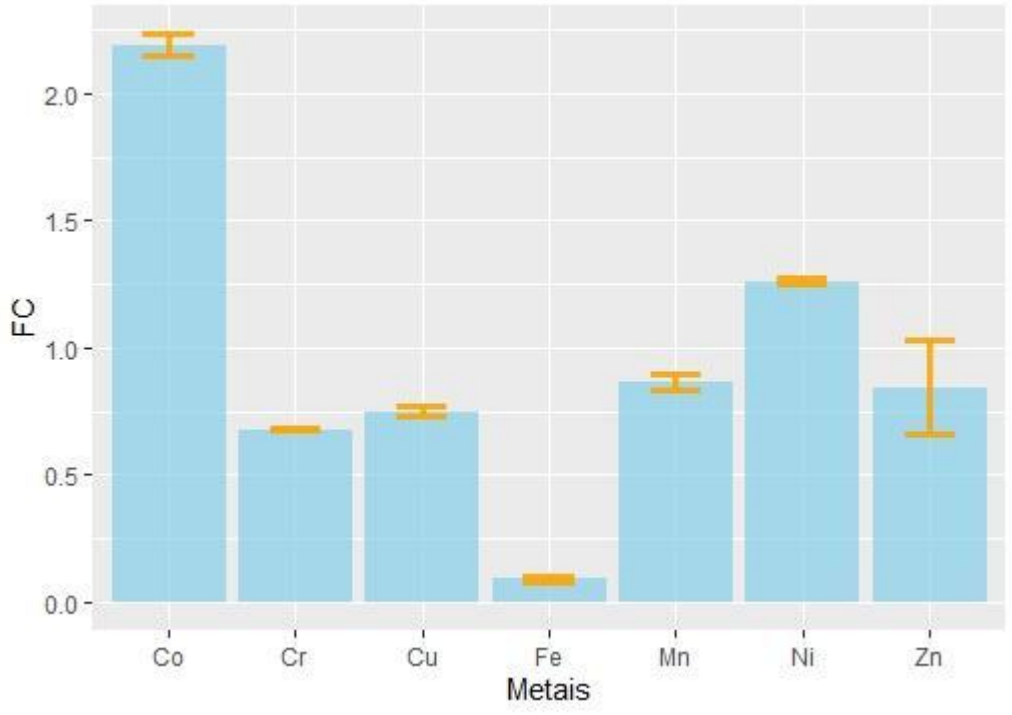


Figura 5 - (FC)Fator de contaminação para Carás (S3).

A Figura 5 apresenta a distribuição dos metais Co, Cr, Cu, Mn, Ni e Zn no ponto de coleta S3, localizado na região do Rio Carás, em uma área predominantemente rural e afastada da zona urbana de Juazeiro do Norte. Apesar da menor influência urbana direta, observa-se a presença desses metais, o que sugere a contribuição de fontes difusas associadas às atividades agropecuárias locais. Em áreas rurais, o uso de fertilizantes, corretivos agrícolas, defensivos e rações animais pode introduzir metais traço no solo, promovendo seu acúmulo gradual ao longo do tempo (VASCONCELOS *et al.,* 2024; CORRÊA *et al.*, 2024).

A região é caracterizada pela presença de residências rurais e pela prática de agropecuária familiar, atividades que podem contribuir para o aporte difuso e contínuo de metais ao solo, principalmente por meio do uso de fertilizantes, corretivos agrícolas, rações animais e defensivos, nos quais elementos como Cu, Zn, Mn e Ni são comumente empregados.

Além disso, práticas de manejo do solo e a ausência de sistemas adequados de tratamento de efluentes domésticos em áreas rurais podem favorecer o transporte desses metais para os cursos d'água. Durante eventos de chuva intensa, o escoamento superficial pode mobilizar partículas do solo e transportar metais associados ao solo para o leito do rio, contribuindo para sua deposição em áreas de menor declividade (SILVA *et al*., 2025). A ausência de enriquecimento significativo de Fe reforça a hipótese de que a contribuição geogênica não seja dominante nesse ponto, indicando que os teores observados resultam majoritariamente de atividades antrópicas de baixa intensidade, porém persistentes ao longo do tempo.

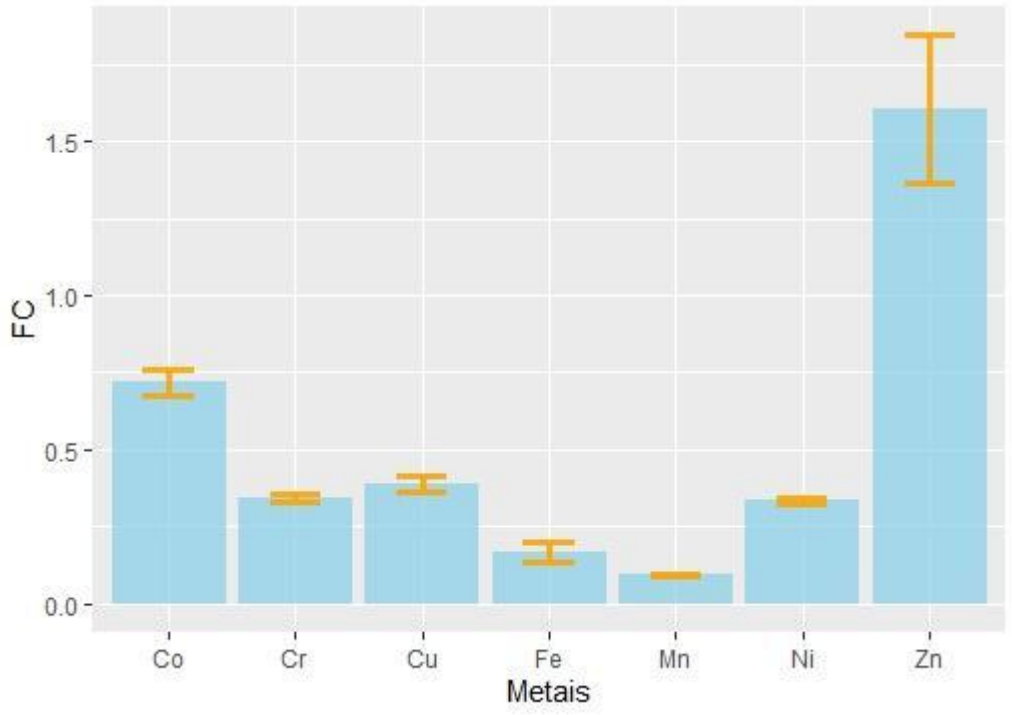


Figura 6- (FC) Fator de contaminação para Riacho dos Macacos (S3).

A Figura 6 apresenta a distribuição do fator de contaminação (FC) dos metais Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn no ponto de coleta S4, localizado no Riacho dos Macacos. Entre os elementos analisados, o Zn apresentou o maior valor de FC, indicando um nível de contaminação significativamente superior aos demais metais e sugerindo forte influência antrópica nesse ponto. Esse comportamento é compatível com a natureza do local, que recebe escoamentos urbanos e

efluentes provenientes de diferentes atividades regionais, incluindo pequenas indústrias, oficinas mecânicas, beneficiamento de calçados e descarte de resíduos associados a tintas e materiais metálicos, nos quais o Zn é amplamente utilizado (CORRÊA *et al.*, 2024; MARTINS, 2024).

Os metais Co, Cu e Ni apresentaram valores intermediários de FC, sugerindo enriquecimento moderado e indicando a contribuição de fontes antrópicas difusas. Por outro lado, Cr e Mn exibiram fatores de contaminação próximos da unidade, sugerindo influência mista entre processos naturais e aportes antrópicos. O ferro (Fe) apresentou baixos valores de FC, comportamento típico de um elemento de origem predominantemente geogênica, frequentemente associado à composição mineralógica natural do solo e dos sedimentos (VASCONCELOS *et al.,* 2024).

De forma geral, o padrão de distribuição observado no ponto S4 evidencia um cenário de contaminação heterogênea, fortemente influenciado por atividades urbanas e industriais de pequeno porte, com destaque para o enriquecimento de Zn, elemento frequentemente reportado como marcador de contaminação em ambientes urbanos e periurbanos (CORRÊA *et al.*, 2024).

5.2 RISCOS

Nessa seção, apresentamos os resultados dos riscos carcinogênicos referentes a ingestão (de forma direta ou indireta) e ao contato dérmico com os solos investigados (levando em consideração os teores de Ni e Cr encontrados), bem como seus riscos ambientais. As concentrações médias de cromo (Cr) e níquel (Ni) utilizadas nos cálculos de risco carcinogênico variaram entre 7,738 e 24,002 mg/kg para Cr e entre 4,326 e 16,349 mg/kg para Ni nos diferentes pontos amostrais da sub-bacia do Rio Salgado. Os maiores teores de Cr foram observados nos pontos Estabilização (24,002 mg/kg) e Carás (21,782 mg/kg), enquanto o maior teor de Ni foi registrado em Carás (16,349 mg/kg). Esses resultados indicam variabilidade espacial na distribuição dos metais e justificam sua utilização na estimativa do risco carcinogênico associado à exposição ao solo (USEPA, 2007; KABATA-PENDIAS, 2011; ALLOWAY, 2013).

Todos os resultados gráficos referentes aos riscos carcinogênicos (CRs) são apresentados na escala logarítmica, facilitando assim suas visualizações. O risco carcinogênico foi avaliado em três populações: crianças, adolescentes e adultos, com características especificadas nos Quadros 2 e 3.

5.2.1. Risco carcinogênico Total para contato dérmico e via oral

A Figuras 7 apresenta a estimativa do risco carcinogênico total associado à exposição ao solo contaminado por metais traços, considerando as vias de ingestão e contato dérmico, com base nos teores de Ni e Cr determinados nas amostras analisadas. Observa-se que, em todos os pontos de coleta avaliados, os valores de risco carcinogênico total permaneceram abaixo do limite máximo aceitável de 1×10^{-4}, conforme critérios estabelecidos pela USEPA, indicando que não há risco carcinogênico para a população exposta nas condições atuais (USEPA, 2007; EMMANUEL *et al.,* 2022).

Os resultados de risco carcinogênico total acompanharam, de modo geral, a distribuição das concentrações de Cr e Ni nos solos, com maiores valores nos pontos Lagoa de Estabilização e Carás. Para a via de ingestão, os valores de TCR variaram de $1{,}23\times10^{-6}$ a $3{,}37\times10^{-6}$, enquanto para a via dérmica variaram de $5{,}06\times10^{-4}$ a $1{,}54\times10^{-3}$. Esses resultados evidenciam que a magnitude do risco estimado está diretamente relacionada aos teores médios dos metais determinados nas amostras de solo (SHETTY *et al.,* 2024; PANQING *et al*., 2023).

Verifica-se ainda que a via dérmica apresenta contribuição significativamente superior à via de ingestão, comportamento esperado em estudos de avaliação de risco em solos, em função do contato direto e contínuo com o material particulado. Entre os pontos analisados, destacam-se os S2 e S3, que apresentaram valores relativamente mais elevados, embora ainda inseridos na faixa considerada aceitável. Esses resultados refletem a influência dos teores de Ni e Cr observados nesses pontos e reforçam a importância do monitoramento contínuo, uma vez que valores próximos

ao intervalo de atenção (10^{-6}–10^{-4}) indicam potencial de risco em cenários futuros de aumento da exposição ou intensificação das atividades antrópicas (EMMANUEL *et al.*, 2022; CORRÊA *et al.,* 2024).

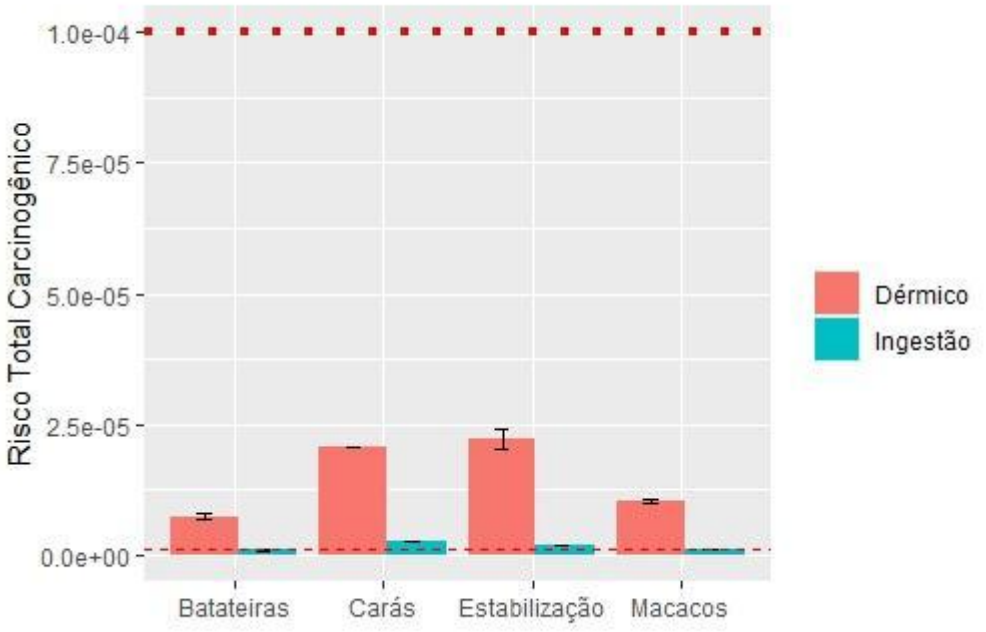


Figura 7 - TCR por ingestão e contato dérmico para crianças.

Na Figura 8 apresenta-se o risco carcinogênico total (TCR) estimado para o grupo etário de adolescentes, considerando as vias de ingestão e contato dérmico com solos contaminados por metais traços. Observa-se que, em todos os pontos de coleta avaliados, a via dérmica constitui a principal contribuição para o risco carcinogênico total, enquanto a via de ingestão apresenta valores significativamente inferiores, comportamento já relatado em estudos que apontam o contato dérmico como uma via relevante de exposição em ambientes contaminados por metais (ZHANG *et al.*, 2024; LIU *et al.,* 2023).

Esse comportamento é coerente com as premissas do modelo de avaliação de risco adotado, uma vez que adolescentes tendem a apresentar maior frequência de contato direto com o solo, maior área de pele exposta e maior tempo de permanência em ambientes externos. Além disso, estudos indicam que diferentes grupos etários apresentam padrões distintos de exposição e susceptibilidade, sendo a avaliação por faixa etária essencial para uma estimativa mais realista do risco à saúde humana (WANG *et al.*, 2024; SHETTY *et al.*, 2024).

Entre os pontos analisados, destacam-se os locais associados ao S3 e S2, que apresentaram os maiores valores de TCR, embora ainda inferiores ao limite máximo aceitável de 1×10^{-4} estabelecido pela USEPA. Esses resultados refletem os maiores teores de metais carcinogênicos, especialmente Ni e Cr, previamente identificados nesses pontos, evidenciando a influência de aportes antrópicos cumulativos ao longo do tempo.

Os pontos de S1 e S4 apresentaram valores de risco inferiores, porém inseridos na faixa de atenção (10^{-6}–10^{-4}), indicando que, apesar de não configurarem risco inaceitável nas condições atuais, demandam monitoramento ambiental contínuo. De forma geral, os resultados para adolescentes reforçam a importância de considerar grupos etários mais sensíveis em avaliações de risco, uma vez que pequenas variações nas concentrações dos contaminantes ou nas condições de exposição podem resultar em incrementos relevantes no risco carcinogênico ao longo do tempo.

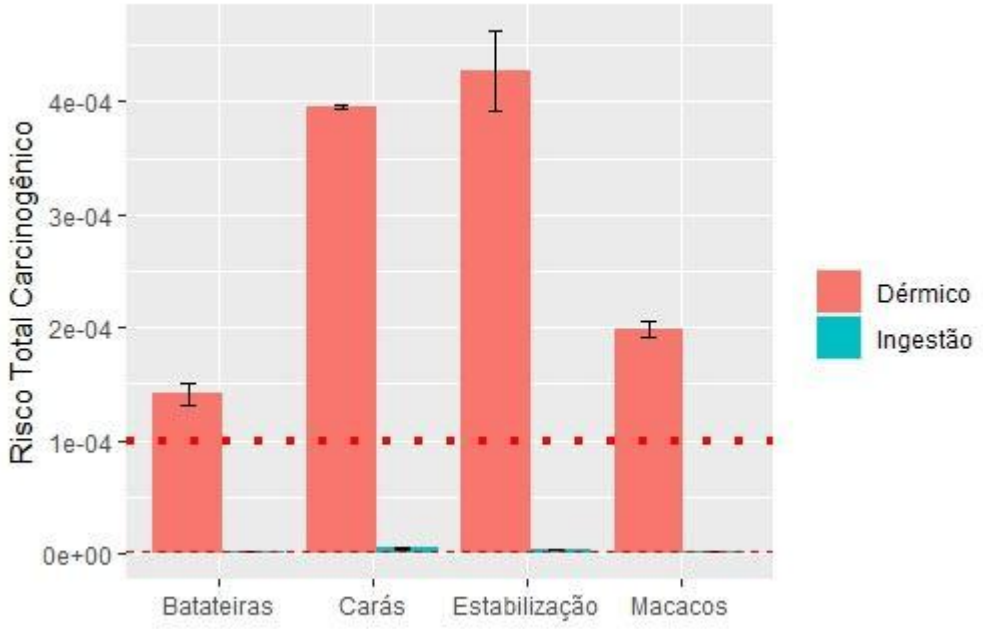


Figura 8 - TCR por ingestão e contato dérmico para adolescentes.

A Figura 9 apresenta a estimativa do risco carcinogênico total (TCR) para o grupo etário de adultos, considerando as vias de ingestão e contato dérmico com solos contaminados por metais traços. Observa-se que, assim como verificado para adolescentes, a via dérmica constitui a principal contribuição para o risco carcinogênico total em todos os pontos avaliados, enquanto a via de ingestão apresenta valores significativamente inferiores, comportamento amplamente reportado na literatura para exposição a metais em solos contaminados (ZHANG *et al.*, 2024; LIU *et al.,* 2023).

Entre os pontos analisados, destaca-se a área associada ao ponto S2, que apresentou o maior valor de TCR, aproximando-se ou ultrapassando o limite superior de risco aceitável de 1×10^{-4}

estabelecido pela USEPA, indicando um potencial risco carcinogênico para adultos expostos. Esse resultado está diretamente relacionado às maiores concentrações de metais como Ni e Cr previamente identificadas nesse ponto, reforçando a influência de fontes antrópicas, como lançamento de efluentes urbanos e atividades agropecuárias. Estudos recentes demonstram que áreas sob maior pressão antrópica tendem a apresentar maiores níveis de contaminação por metais e, consequentemente, maiores riscos à saúde humana (PANQING *et al.,* 2023; ZHOU *et al.*, 2024).

Além disso, embora adultos apresentem menor susceptibilidade relativa quando comparados a crianças, a exposição contínua e cumulativa ao longo do tempo pode representar um fator relevante na avaliação do risco carcinogênico, especialmente em ambientes com presença persistente de metais potencialmente tóxicos (WANG *et al.,* 2024; EMMANUEL *et al.*, 2022).

Esses resultados refletem o efeito cumulativo da exposição prolongada ao solo contaminado, especialmente em ambientes que atuam como sumidouros de metais carcinogênicos, como Ni e Cr. De forma geral, a avaliação para adultos evidencia que, embora o risco carcinogênico não seja homogêneo entre os pontos de coleta, áreas com histórico de acúmulo de contaminantes demandam atenção prioritária e reforçam a necessidade de monitoramento ambiental contínuo e de estratégias de mitigação do risco.

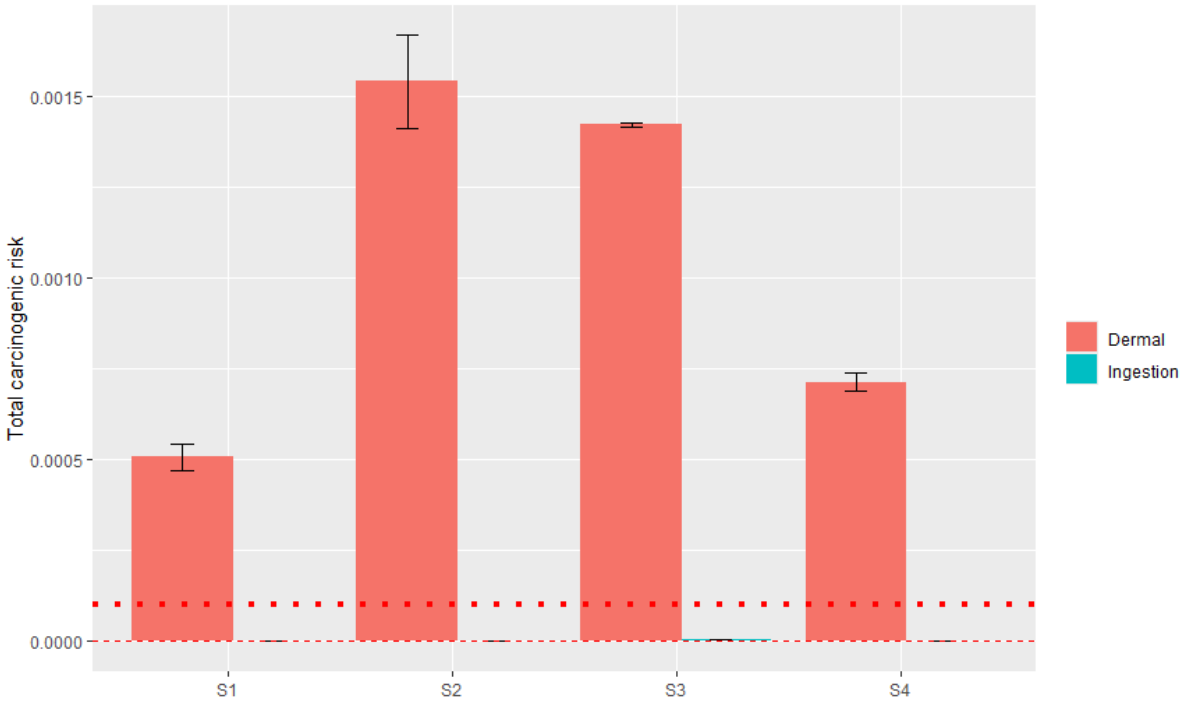


Figura 9 - TCR por ingestão e contato dérmico para adultos.

5.2 Avaliação do risco ambiental

Nessa seção, apresentamos uma avaliação ambiental dos solos coletados nos pontos S1, S2, S3 e S4 em relação aos teores de Ni e Cr encontrados. A avaliação foi guiada pelos seguintes índices de riscos ambientais: Índice de geoacumulação (I_{geo}) e Índice de Carga Poluente (PLI), amplamente utilizados em estudos ambientais para avaliar o grau de contaminação por metais em solos e sedimentos (MÜLLER, 1969; TOMLINSON et al., 1980; LOSKA; WIECHUŁA, 2003). As Figuras 9 a 12 apresentam os resultados para (Igeo) referentes aos teores de Ni e Cr, respectivamente, encontrados nas amostras de solos.

Na Figura 10, referente ao ponto de coleta S1, a análise do índice de geoacumulação (Igeo) evidencia um predomínio do controle geogênico na distribuição dos metais. O ferro (Fe) apresentou os maiores valores de Igeo, refletindo sua elevada abundância natural nos solos da região, caracterizados por intenso intemperismo e enriquecimento em óxidos e hidróxidos de ferro, típicos de ambientes tropicais (KABATA-PENDIAS, 2011; ALLOWAY, 2013). Os metais cromo (Cr) e manganês (Mn) apresentaram valores aproximadamente equivalentes à metade do observado para o Fe, comportamento consistente com sua associação geoquímica às fases de ferro, uma vez que ambos tendem a coprecipitar ou adsorver-se aos óxidos de Fe presentes no solo (SPARKS, 2003; SANTOS *et al.*, 2019).

Por sua vez, o níquel (Ni) e o cromo (Cr) exibiram valores mais baixos de Igeo, embora tenham sido detectados nas amostras, o que pode indicar uma influência antrópica de baixa intensidade, possivelmente relacionada às atividades industriais locais, como fábricas de calçados e cerâmicas. No entanto, os baixos índices de geoacumulação para Ni e Cr sugerem que esses aportes não são suficientes para caracterizar acúmulo significativo no solo, reforçando a predominância do fundo natural no Sítio Batateiras, com contribuição antrópica secundária e localizada. Esse comportamento tem sido observado em estudos realizados no semiárido nordestino, onde a presença de metais pode estar associada tanto a fontes naturais quanto a aportes difusos de origem antrópica (OLIVEIRA *et al.,* 2023; SILVA; MELO, 2017).

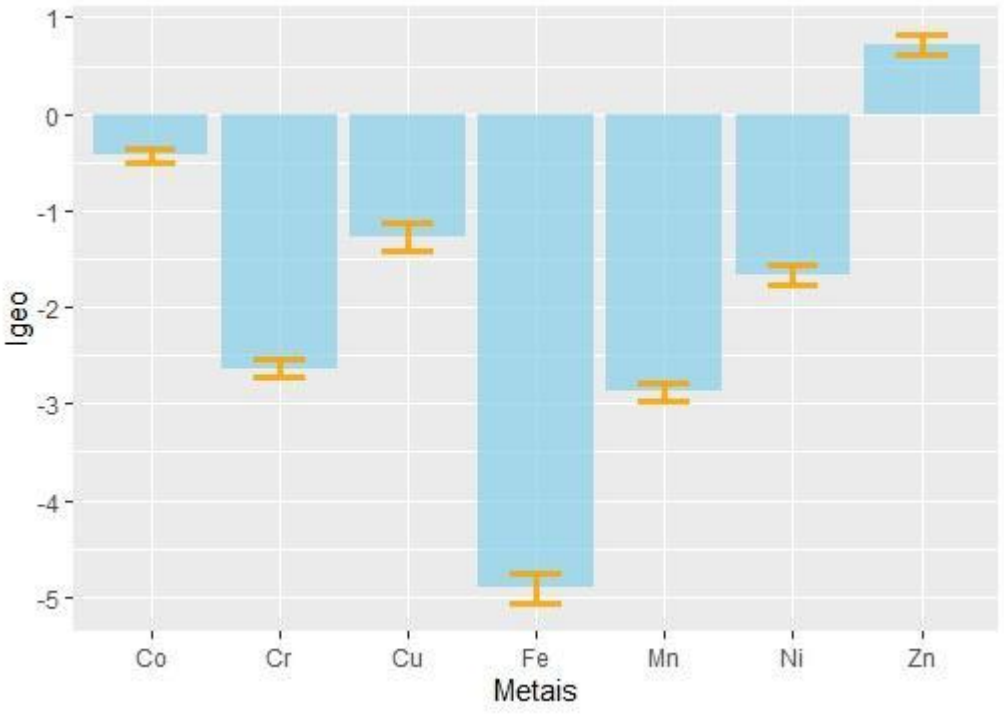


Figura 10 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto de coleta Batateiras.

Na Figura 11 apresentam-se os valores do índice de geoacumulação (Igeo) calculados para os metais analisados no ponto de coleta S2. Observa-se que Fe, Mn e Ni foram os elementos que apresentaram os maiores valores de Igeo, destacando-se em relação aos demais metais avaliados. Esse comportamento indica uma maior contribuição desses elementos no solo, podendo refletir tanto características naturais do material de origem quanto o aporte contínuo associado às atividades antrópicas que influenciam esse sistema .

O ponto S2 recebe efluentes domésticos e, possivelmente, contribuições difusas de áreas urbanas e periurbanas, o que favorece o acúmulo de metais associados à matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e manganês, fases geoquímicas reconhecidas por sua elevada capacidade de adsorção e coprecipitação de elementos-traço (SPARKS, 2003; SANTOS *et al.,* 2019). Os teores mais elevados de Fe e Mn podem estar relacionados à própria geologia local, marcada por solos ricos nesses elementos, além de processos redox típicos de ambientes lênticos e com elevada carga orgânica, como lagoas de estabilização (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Nessas condições, a alternância entre ambientes oxidantes e redutores favorece a mobilização e posterior retenção desses metais nos solos. O Ni, por sua vez, tende a apresentar afinidade com óxidos de Fe e Mn e com a fração fina do solo, o que explica sua maior expressividade no índice de geoacumulação nesse ponto de coleta (ALLOWAY, 2013; SPARKS, 2003). Em contraste, Co, Cr e Cu apresentaram valores de Igeo positivos, porém menos

expressivos, sugerindo presença associada a fontes difusas e a aportes antrópicos de menor intensidade, como efluentes urbanos e resíduos sólidos (ZHOU *et al.,* 2024; PANQING *et al.,* 2023). Em contraste, Co, Cr e Cu apresentaram valores de Igeo positivos, porém menos expressivos, sugerindo presença associada a fontes difusas e a aportes antrópicos de menor intensidade, como efluentes urbanos, resíduos domésticos e possíveis contribuições de atividades industriais e comerciais da área urbana de Juazeiro do Norte.

Esses metais, embora presentes, parecem não estar sofrendo um enriquecimento tão acentuado quanto Fe, Mn e Ni, possivelmente devido a diferenças em sua mobilidade geoquímica e formas de associação no sedimento.

O Zn, por sua vez, manteve-se com os menores valores de Igeo entre os metais avaliados, indicando baixo grau de geoacumulação nesse ambiente. Esse comportamento pode estar relacionado à maior mobilidade do Zn em ambientes aquáticos, favorecendo sua remobilização e transporte, além de uma menor afinidade com as fases sólidas predominantes no S2.

Assim, o padrão observado na Figura 10 reflete a interação entre características naturais do meio, processos geoquímicos típicos de ambientes de tratamento de efluentes e a influência antrópica associada ao contexto urbano de Juazeiro do Norte, evidenciando a lagoa de estabilização como um importante compartimento de retenção de determinados metais, especialmente Fe, Mn e Ni, comportamento também observado em estudos recentes em ambientes impactados por efluentes urbanos (PANQING *et al.*, 2023; ZHOU *et al.,* 2024).

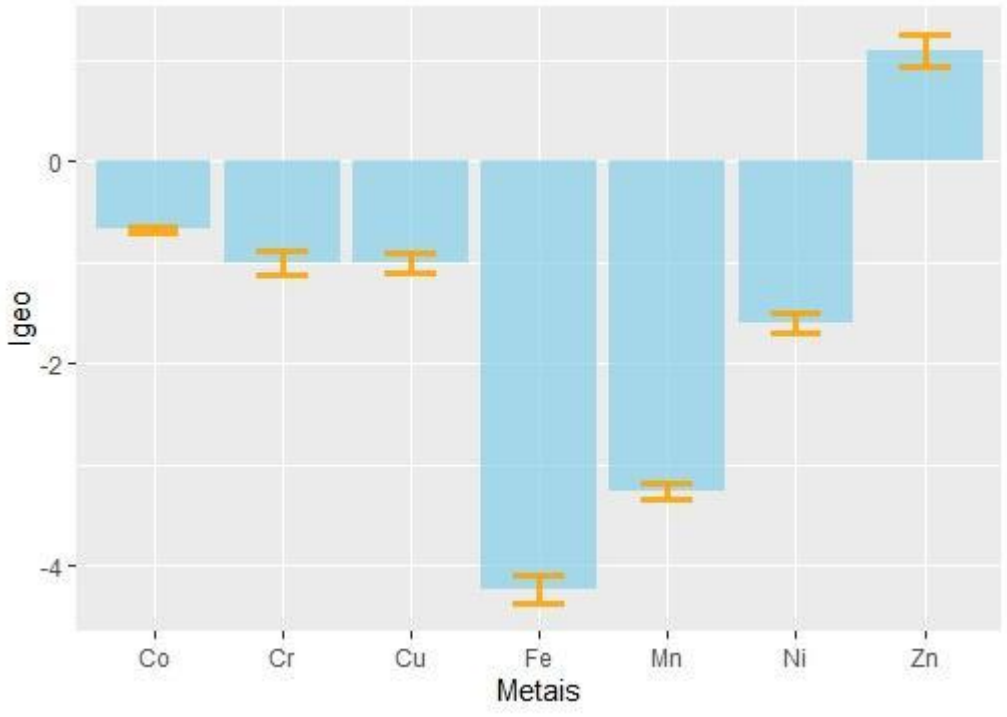


Figura 11 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto de Lagoa de Estabilização.

Na Figura 12 é apresentado o Índice de Geoacumulação (I_{geo}) para os metais analisados no ponto de coleta S3, evidenciando diferenças marcantes no comportamento geoquímico dos elementos avaliados. Observa-se que o ferro (Fe) foi o metal que apresentou o maior pico de Igeo, destacando-se de forma expressiva em relação aos demais. Esse resultado está fortemente associado às características naturais do ambiente, uma vez que os solos do estado do Ceará e da região do Cariri apresentam enriquecimento natural em ferro, decorrente da composição geológica e dos processos pedogenéticos intensos típicos de regiões tropicais, especialmente sob influência da Chapada do Araripe (CPRM, 2016; Lima Silva *et al.,* 2021).

A predominância de Fe nesses ambientes está diretamente relacionada à formação de óxidos e hidróxidos de ferro, que desempenham papel fundamental na retenção e controle da mobilidade de metais traços em solos tropicais. Estudos recentes realizados em solos brasileiros demonstram que esses minerais atuam como importantes adsorventes naturais, influenciando a distribuição e a biodisponibilidade de elementos metálicos (Vasconcelos *et al.,* 2024 ; Teixeira Filho, 2016). Dessa forma, a elevada concentração de Fe observada pode ser atribuída predominantemente a contribuições geogênicas, intensificadas por processos de intemperismo e pela concentração desses elementos nas frações mais finas do solo.

Os metais Cr, Cu, Zn e Mn apresentaram valores intermediários de Igeo, indicando presença moderada no ambiente. Esse comportamento pode ser explicado pela combinação entre o background natural da área e aportes antrópicos de baixa a média intensidade. No contexto do Nordeste brasileiro, estudos indicam que atividades agropecuárias representam uma das principais fontes difusas de metais em solos, devido ao uso contínuo de fertilizantes, corretivos e defensivos agrícolas, que podem introduzir elementos traço no ambiente ao longo do tempo (Souza *et al.*, 2022; Silva *et al*., 2021).

O níquel (Ni) apresentou valores reduzidos de Igeo, indicando baixa expressividade quando comparado aos metais anteriormente citados. Essa baixa ocorrência pode estar relacionada à menor concentração natural do elemento nos solos da região e à sua maior mobilidade geoquímica, o que favorece processos de lixiviação, especialmente em ambientes com variação de umidade e características físico-químicas que não favorecem sua retenção. Ainda assim, sua presença, mesmo discreta, sugere influência difusa de fontes naturais ou antrópicas pontuais.

Por fim, o cobalto (Co) foi o metal que apresentou os menores valores de Igeo no S3, posicionando-se abaixo dos demais elementos avaliados. Esse comportamento pode ser justificado pela baixa abundância natural do Co nos materiais de origem da área e pela ausência de fontes antrópicas significativas capazes de promover seu enriquecimento no solo. Além disso, o Co tende a apresentar menor afinidade com as fases sólidas predominantes no ambiente, o que limita sua retenção e resulta em baixos níveis de geoacumulação.

De modo geral, o padrão observado no S3 reflete a forte influência dos fatores geogênicos, especialmente para o Fe, aliada a contribuições antrópicas moderadas associadas às práticas agropecuárias locais, controlando a distribuição e o grau de geoacumulação dos demais metais no solo.

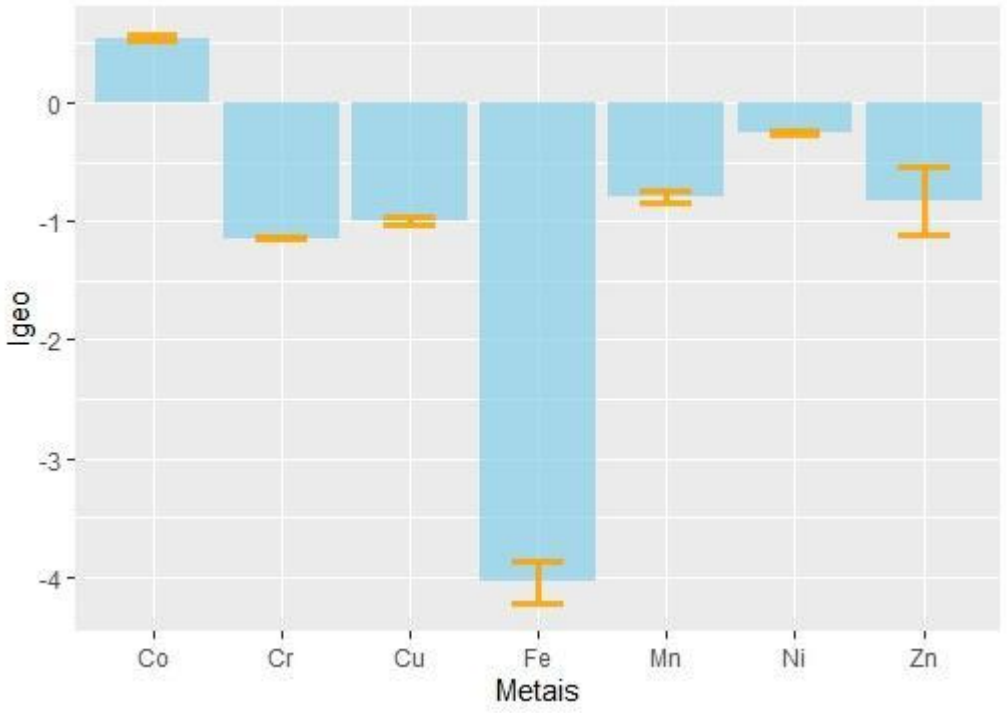


Figura 12 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto Sitio Carás.

A Figura 13 apresenta o Índice de Geoacumulação (I_{geo}) para o ponto S4. Diferentemente do observado no ponto S3, o ponto S4 evidencia um padrão de geoacumulação mais homogêneo e elevado para praticamente todos os metais analisados, com exceção do Zn, que apresentou valores inferiores aos demais. Nesse ambiente, destaca-se de forma expressiva o manganês (Mn), que apresentou os maiores valores de Igeo, superando inclusive o ferro. Esse comportamento pode ser explicado pela combinação de fatores geoquímicos, hidrológicos e antrópicos característicos de

sistemas fluviais, especialmente em regiões semiáridas sujeitas a variações sazonais de vazão e aporte de matéria orgânica (Souza et al., 2022; Vasconcelos et al., 2024).

O predomínio do Mn no ponto S4 está fortemente associado à dinâmica redox típica de ambientes fluviais. Em sistemas aquáticos, o manganês apresenta comportamento altamente dependente das condições de oxirredução, sendo frequentemente mobilizado em ambientes com elevada carga orgânica e baixa disponibilidade de oxigênio dissolvido. Nessas condições, o Mn^{4+} presente nos óxidos é reduzido a Mn^{2+}, forma mais solúvel, favorecendo sua mobilização na coluna d'água (Hu *et al.,* 2024; Zhang *et al.*, 2023). Posteriormente, em condições mais oxigenadas, ocorre a reoxidação e a reprecipitação do Mn, promovendo seu acúmulo nos sedimentos. Esse ciclo contínuo de dissolução-precipitação faz com que o manganês apresenta picos elevados de concentração e, consequentemente, maiores valores de Igeo.

Posteriormente, em condições mais oxigenadas, ocorre a reoxidação do Mn^{2+} e sua precipitação sob a forma de óxidos, promovendo seu acúmulo nos sedimentos. Esse processo cíclico de dissolução e precipitação é amplamente descrito em estudos recentes como um dos principais mecanismos responsáveis pelo enriquecimento de manganês em sedimentos fluviais, especialmente em áreas com influência de matéria orgânica e variações hidrológicas (Olawade *et al.*, 2024; Sibiya *et al.,* 2024).

Além disso, no contexto do Nordeste brasileiro, fatores como regime intermitente de rios, períodos de estiagem prolongada e eventos de cheia contribuem para intensificar esses processos, favorecendo a redistribuição e o acúmulo de metais nos sedimentos (SOUZA *et al.,* 2022; CPRM, 2016). Dessa forma, os elevados valores de Igeo para o Mn observados no ponto S4 refletem não apenas a dinâmica geoquímica do elemento, mas também a influência das condições ambientais e hidrológicas típicas da sub-bacia do Rio Salgado. Diferentemente do S3, onde predomina uma influência geogênica mais estável, o S4 apresenta maior dinamismo ambiental, favorecendo a concentração de Mn no solo.

O comportamento elevado dos demais metais, como Fe, Cr, Cu, Ni e Co, reforça a hipótese de uma contribuição antrópica mais intensa nesse ponto de coleta, associada à proximidade com áreas urbanizadas, uso do solo agrícola e transporte de partículas finas ricas em metais ao longo do curso d'água. Já o Zn, apesar de presente, manteve valores de Igeo inferiores, o que pode ser explicado por sua maior mobilidade em meio aquático e menor tendência à retenção nos sedimentos sob as condições físico-químicas predominantes no riacho.

Assim, o destaque do manganês no S4 decorre principalmente da interação entre processos redox, aporte de matéria orgânica e dinâmica hidrossedimentológica, tornando esse ambiente particularmente favorável ao enriquecimento desse metal em comparação aos demais pontos de coleta analisados.

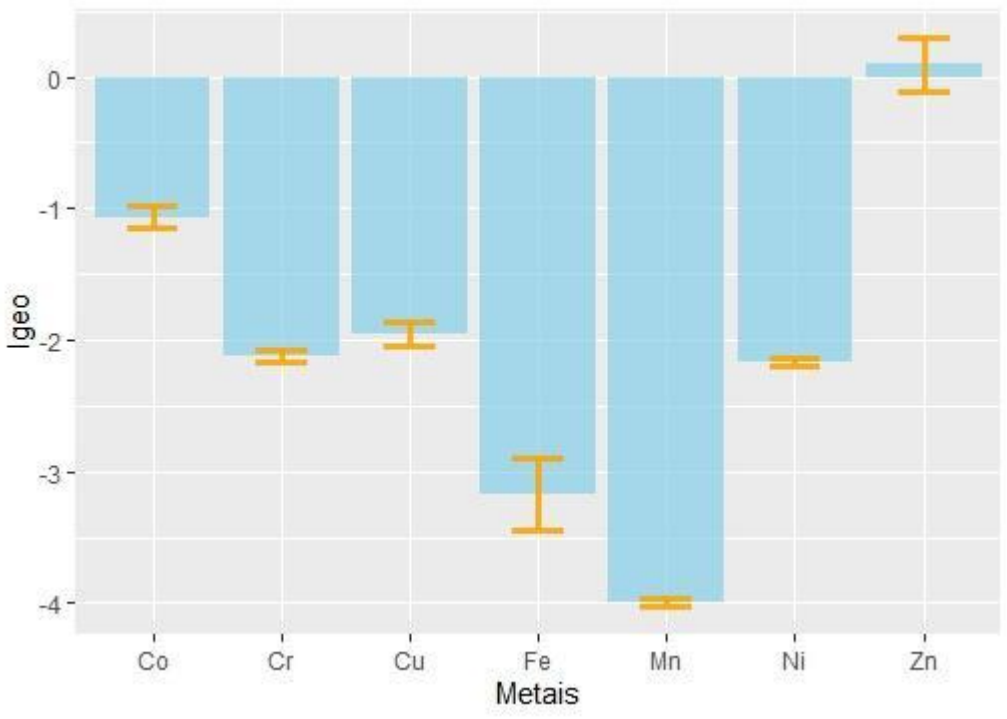


Figura 13 - Índice de geoacumulação (I_{geo}) para o ponto Riacho dos Macacos.

O Índice de Carga Poluente (PLI) apresentado na Figura 13 fornece uma avaliação integrada do grau de contaminação metálica nos diferentes pontos de coleta, permitindo a comparação relativa entre as áreas estudadas. Para o cálculo desse índice, foram considerados exclusivamente os metais níquel (Ni) e cromo (Cr), uma vez que estes são os únicos elementos que possuem valores de background geoquímico regional estabelecidos no Atlas Geoquímico do Estado do Ceará, o que confere maior confiabilidade à análise comparativa entre os pontos amostrais.

Os resultados indicam que o ponto S3 apresentou o maior valor de PLI, caracterizando-se como a área com maior carga poluente relativa entre os pontos avaliados. Esse comportamento sugere um enriquecimento simultâneo de Ni e Cr em relação aos valores naturais de referência do estado, podendo estar associado à combinação de fatores geogênicos locais e à influência de atividades agropecuárias, que favorecem a mobilização desses metais no solo por meio do revolvimento, escoamento superficial e transporte de partículas finas.

A lagoa de estabilização apresentou o segundo maior valor de PLI, refletindo a influência contínua do lançamento de efluentes urbanos. Nesse ambiente, a elevada carga de matéria orgânica e a presença de óxidos de ferro e manganês favorecem a retenção de Ni e Cr nos solos, resultando em um aumento da carga poluente quando comparado aos valores de fundo estabelecidos no Atlas Geoquímico do Ceará.

O ponto S1 apresentou um valor intermediário de PLI, indicando uma condição de impacto moderado. Esse resultado pode ser explicado pela influência mista de áreas urbanas e rurais ao longo do curso d'água, onde o carreamento difuso de materiais do solo contribui para a introdução de Ni e Cr, porém em menor intensidade quando comparado aos pontos de S3 e S2.

Por fim, o S4 apresentou o menor valor de PLI, sugerindo que as concentrações de Ni e Cr nesse ponto se mantêm mais próximas dos valores de background geoquímico definidos pelo Atlas Geoquímico do Estado do Ceará. Esse comportamento indica menor pressão antrópica relativa e/ou maior capacidade de diluição e dispersão desses metais no sistema.

De forma geral, a aplicação do PLI com base nos valores de referência do Atlas Geoquímico do Estado do Ceará permitiu hierarquizar os pontos de coleta quanto ao grau de carga poluente metálica, evidenciando diferenças espaciais significativas e reforçando a importância da utilização de dados regionais de background na avaliação ambiental.

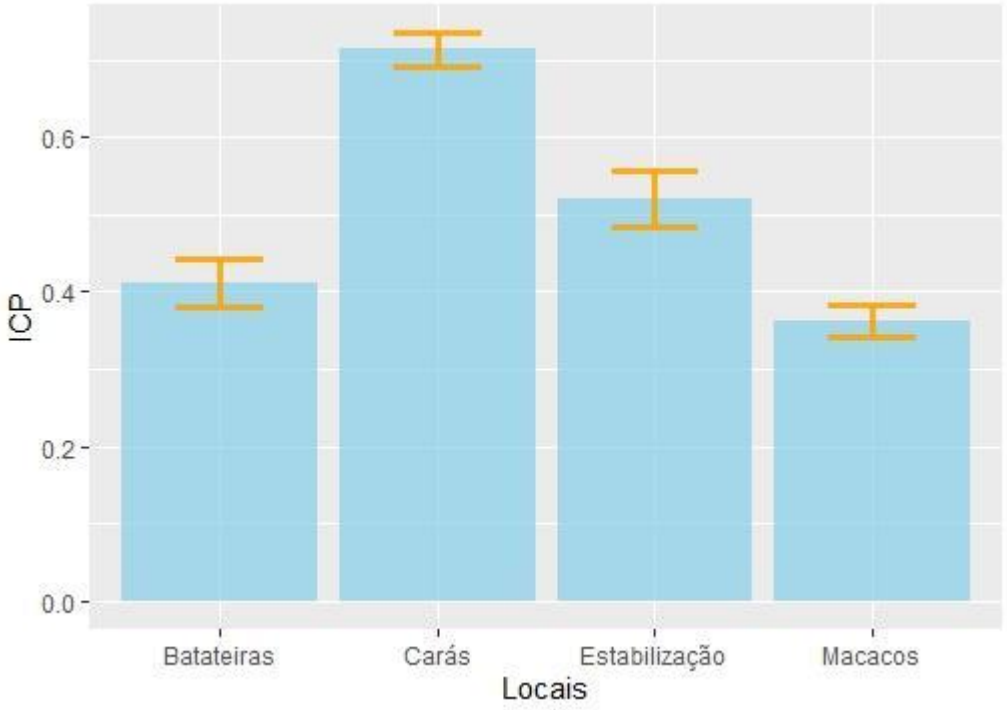


Figura 14- Índice de carga poluente .

Quadro - Comparação teores de metais traços em solos desta pesquisa com estudos regionais, nacionais e internacionais.

Local/ Estudo	**Tipo de amostra**	**Elementos avaliados**	**Principais resultados**	**Interpretação**
Este estudo (Leito do Rio Salgado- Ce)	Solo	Ni, Cr, Fe, Mn, Zn, Cu, Co	Maior PLI em S3; Mn elevado em S4; Fe dominante; Zn com baixa geoacumulação	Influência mista (geoquímica + antrópica), com destaque para atividades agropecuárias e urbanas
Alves et al., (2021)- Sub-bacia do Rio Salgado Ce	Sedimento	Ni, Cr, Zn, Cu	Enriquecimento moderado de zn e Ni em áreas urbanas	Influência antrópica associada à urbanização
Corrêa et al., Nordeste brasileiro	Solo/Sedimento	Fe, Mn, Ni, Cr	Elevada retenção de metais em áreas com matéria orgânica e óxidos de Fe e Mn	Controle por processos geoquímicos e ambientes redox
Vasconcelos et al., (2024)- Bacias urbanas	Solo	Ni, Cr, Cu, Zn	Aumento de metais em áreas com uso agrícola e urbano	Contribuição difusas de atividades humanas
CRM (2016) - Atlas Geoquímico do Ceará	Solo	Ni,Cr	Valores de background regional	Base de comparação para avaliação ambiental
Alloway (2013)	Solo	Diversos metais	Metais associados à matéria orgânica e óxidos metálicos	Controle geoquímico da mobilidade e retenção
Kabata- Pendias (2011)	Solo	Diversos metais	Distribuição influenciada por intemperismo e composição do solo	Predominância de fatores naturais em solos tropicais

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

O Quadro acima apresenta uma comparação entre os teores de metais traços determinados nos solos da sub-bacia do Rio Salgado e aqueles reportados na literatura para ambientes

semelhantes em escala regional e nacional. Essa abordagem permite avaliar o grau de contaminação observado, bem como identificar padrões de comportamento geoquímico e influência antrópica em diferentes contextos ambientais.

De modo geral, os resultados deste estudo apresentam comportamento semelhante ao observado em outras bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro, especialmente no que se refere ao enriquecimento de metais como Ni e Cr em áreas sob influência antrópica. Estudos anteriores na própria sub-bacia do Rio Salgado indicam padrões compatíveis, com destaque para a influência de atividades urbanas e industriais no aumento dos teores desses elementos (ALVES *et al.,* 2021).

Além disso, a associação dos metais com óxidos de ferro e manganês, observada neste trabalho, está em concordância com a literatura, que aponta essas fases como importantes controladoras da mobilidade e retenção de elementos traço em solos tropicais (ALLOWAY, 2013; KABATA-PENDIAS, 2011). Em ambientes com elevada carga orgânica, como lagoas de estabilização, esse comportamento tende a ser ainda mais pronunciado, conforme destacado por Corrêa *et al.*, (2024).

CAPÍTULO- 6

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contaminação por metais tóxicos em solos representa uma das questões mais relevantes da química ambiental contemporânea, sobretudo em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água é limitada e os corpos hídricos cumprem funções vitais de abastecimento, produção agrícola e manutenção da biodiversidade. Nesse contexto, a problemática se articula diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente a ONU ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ODS 15 (Vida Terrestre), que enfatizam a necessidade de preservação dos recursos naturais e gestão sustentável dos ecossistemas. O presente estudo buscou avaliar a presença de Co, Cr, Cu, Mn, Ni e Zn no leito do Rio Salgado, na região do Cariri cearense, associando análises geoquímicas a índices de risco ambiental e humano.

A presente pesquisa permitiu avaliar de forma sistemática a contaminação por metais traços em solos da região do Cariri cearense, a partir da aplicação de índices geoquímicos consagrados e do uso de valores de referência regionais. A integração entre dados analíticos obtidos por técnicas espectrométricas e ferramentas interpretativas, como o Índice de Geoacumulação (Igeo) e o Índice de Carga Poluente (PLI), mostrou-se fundamental para compreender a dinâmica ambiental dos metais e diferenciar contribuições naturais e antrópicas nos distintos pontos de coleta, contribuindo diretamente para metas relacionadas à gestão sustentável dos recursos naturais previstas nas ODS.

Os resultados do Índice de Geoacumulação (Igeo) evidenciaram que ferro (Fe) e manganês (Mn) foram os elementos que apresentaram maior expressividade na maioria dos pontos avaliados. Esse comportamento está fortemente associado às características geológicas e pedológicas da região, uma vez que os solos do sul do Ceará são naturalmente enriquecidos em Fe e Mn, além de esses elementos desempenharem papel central nos processos de adsorção e coprecipitação de metais traços. A elevada presença desses elementos indica predominância de controle geogênico, potencializado por processos de intemperismo, dinâmica redox e concentração nas frações finas do solo e dos sedimentos, evidenciando a importância da compreensão dos processos naturais para o alcance das metas da ODS 15 (Vida Terrestre).

No S3, o Fe apresentou os maiores valores de Igeo, acompanhado por concentrações moderadas de Cr, Cu, Zn e Mn, sugerindo um ambiente sob influência combinada de fatores naturais e aportes antrópicos difusos. A menor expressividade de Ni e Co nesse ponto indica tanto a baixa abundância natural desses metais quanto sua maior mobilidade geoquímica, o que dificulta sua retenção no sistema. Esse padrão é compatível com áreas de uso agropecuário, onde o manejo

do solo favorece o transporte e redistribuição dos metais sem, necessariamente, promover acúmulos extremos, dialogando com os princípios da ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

No S2, observou-se um comportamento distinto, com destaque para Fe, Mn e Ni. Esse padrão reflete a influência direta da recepção contínua de efluentes urbanos, associada à elevada carga de matéria orgânica e às condições físico-químicas favoráveis à retenção de metais nos sedimentos. Esse ambiente atua como um importante compartimento de acumulação, especialmente para metais com afinidade por óxidos de Fe e Mn, reforçando o papel do S2 como zona crítica do ponto de vista ambiental e evidenciando desafios diretamente relacionados à ODS 6 (Água Potável e Saneamento).

O S4 apresentou um cenário diferenciado, no qual praticamente todos os metais, exceto o Zn, exibiram valores elevados de Igeo, com destaque para o Mn. A predominância do manganês nesse ponto está relacionada à intensa dinâmica redox típica de ambientes fluviais, associada a variações hidrológicas, aporte de matéria orgânica e ciclos sucessivos de dissolução e reprecipitação. Esse comportamento evidencia que, além das fontes de contaminação, os processos geoquímicos locais exercem forte controle sobre a distribuição dos metais, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo alinhado às metas ambientais globais.

O zinco (Zn), de modo geral, apresentou baixos valores de Igeo em todos os pontos analisados, comportamento atribuído à sua maior mobilidade em ambientes aquáticos e menor afinidade com as fases sólidas predominantes, o que favorece sua remobilização e reduz sua acumulação nos sedimentos.

A aplicação do Índice de Carga Poluente (PLI), calculado exclusivamente a partir dos metais Ni e Cr, utilizando como referência os valores de background estabelecidos no Atlas Geoquímico do Estado do Ceará, permitiu uma avaliação comparativa robusta entre os pontos de coleta. Os resultados indicaram que o S3 apresentou a maior carga poluente relativa, seguido pela S2, pelo ponto S1 e, por fim, pelo S4, que apresentou os menores valores de PLI. Essa hierarquização evidencia diferentes níveis de pressão antrópica e reforça a importância da utilização de valores regionais de referência para evitar interpretações superestimadas ou subestimadas da contaminação, contribuindo para uma gestão ambiental mais eficaz, conforme preconizado pelas ODS.

De forma integrada, os resultados demonstram que a distribuição dos metais traços na área de estudo é controlada por uma complexa interação entre fatores geogênicos, processos físico-químicos e influências antrópicas associadas ao uso e ocupação do solo. O uso de índices geoquímicos aliado a dados regionais consolidados, como o Atlas Geoquímico do Ceará, mostrou-se essencial para uma interpretação ambiental mais realista e tecnicamente consistente.

Assim, o estudo contribui de maneira significativa para o entendimento da dinâmica dos metais traços no Cariri cearense, fornecendo subsídios científicos relevantes para ações de

monitoramento ambiental, gestão dos recursos hídricos e planejamento territorial. Além disso, reforça seu alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, ao promover conhecimento científico aplicado à preservação ambiental, à qualidade da água e à proteção dos ecossistemas, evidenciando a importância de estudos contínuos que considerem as especificidades geoambientais regionais na avaliação de riscos ambientais

6.2 CONCLUSÃO GERAL

Este estudo avaliou a contaminação e os riscos à saúde humana associados aos elementos traços Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn em solos do leito do Rio Salgado, no Cariri cearense. Os resultados indicaram que a qualidade ambiental é influenciada por uma interação entre fatores geogênicos e atividades antrópicas, como agricultura e expansão urbana.

Os metais Fe e Mn apresentaram maiores concentrações, refletindo a geologia local, enquanto Cr, Cu, Ni e Zn evidenciaram variações associadas também a fontes antrópicas. A aplicação dos índices Igeo e PLI, aliada ao uso de valores de referência regionais, permitiu uma avaliação mais precisa do nível de contaminação e da pressão ambiental nos diferentes pontos analisados.

Em relação à saúde humana, os riscos carcinogênicos permaneceram, em geral, dentro dos limites aceitáveis, com maior contribuição da via dérmica, especialmente para crianças, evidenciando a importância de considerar diferentes vias de exposição.De forma geral, embora haja predominância de controle natural, foram identificadas influências antrópicas pontuais, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e de práticas adequadas de gestão ambiental.

Assim, o estudo contribui para o entendimento da dinâmica dos metais traços na região e oferece subsídios relevantes para o planejamento ambiental e a preservação dos recursos naturais.

7 REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, R**. Impactos do lançamento de efluentes na qualidade da água do riacho Mussuré**. 2006. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

AGUIAR, J. E. **Comparação de metodologias para caracterização da geoquímica de metais-traço em sedimentos da plataforma continental do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) — Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007. 118 p

AKBAR ELSAGH, Hamidreza; JALILIAN, Mohammadreza; GHADERI ASLSHABESTARI, Mohammadreza. **Avaliação da poluição por metais pesados em sedimentos costeiros de Bandar Abbas, Golfo Pérsico, Irã: Poluição por mercúrio e índices geoquímicos ambientais.** Marine Pollution Bulletin, v. 167, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112353.

AL-KHOUD, A. *et al.*, **Metal contamination – a global environmental issue: impacts on soil fertility, water quality, food safety, microbial diversity, vegetation, and aquatic fauna**. RSC Advances, v. 15, p. 1–15, fev. 2025. DOI:10.1039/D4RA04639K.

ALMEIDA, P. H.; FREITAS, R. A.; SOUZA, M. T. **Application of spectrometric and chromatographic techniques in the detection of toxic metals in river sediments.** Environmental Chemistry Letters, v. 21, n. 1, p. 97-105, 2023.

ALLOWAY, B. J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.

ALVES, I. C. C.; SILVA,F. J. A.; BRITO,M.G.S.L.; ARAUJO,A.O.;MENDONÇA,L.A.R **Avaliação de metais em sedimentos de ambientes fluviais do Cariri cearense.** Revista Brasileira de Geociências, 2020.

ASSINE, M. L. **Análise estratigráfica da Bacia do Araripe**, Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geociências, v. 22, n. 3, p. 289–300, 1992.

ATSDR – **Agency for Toxic Substances and Disease Registry.** Toxicological profile for chromium. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2005.

BACON, J. R.; LAMBOURN,D.; MCDONALD, M.; WILLIAMS, J. **Atomic spectrometry update: a review of advances in environmental analysis**. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2024.

BANDEIRA, A. P. N.; MACEDO, C. C. A.; CLARINDO, G. S.; LIMA, M. G. S.; NETO, J. B. S. **Assessment of potential surface degradation resulting from erosion processes in environmentally protected area. Soils and Rocks**, v. 44, n. 1, p. 1–10, 31 mar. 2021.

BARBOSA, Rodrigo Chemite. **Avaliação de risco à saúde humana em função dos cenários de uso do solo em área sob Investigação Detalhada na USP Leste no município de São Paulo (SP)** / Rodrigo Chemite Barbosa. – Rio Claro, 2024. 95p.

BASTI, S.; KUMAR, V.; SINGH, J.; SHARMA, A.; SINGH,S. **Impact of organic carbon forms on heavy metals of river sediments and aquatic ecosystems: a review.** Environmental Earth Sciences, v. 83, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-024-11248-6.

BIDONE, E. D.; CASTILHOS, Z. C. **Mobilidade e retenção de metais pesados em sedimentos fluviais: processos geoquímicos e implicações ambientais.** CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2018.

BRITO, Anielle dos Santos. **Influência do conteúdo orgânico na mobilidade de metais pesados em sedimentos do leito do** … (tese). 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

BRITO, A. S.; BRITO, M. G. S. L.; SILVA, F. J. A.; ALMEIDA, F. S.; AMARO, W. R. O. G. **Conteúdo orgânico de rede natural de drenagem urbana no Cariri cearense, Nordeste do Brasil.** Revista DAE, v. 71, n. 240, p. 216–229, 28 abr. 2023.

CALADO, Bruno de Oliveira. **Atlas geoquímico do estado do Ceará**: projeto levantamento geoquímico de baixa densidade do estado do Ceará. Rio de Janeiro: CPRM, 2016. 157 p.

CETESB – **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de qualidade do solo**. São Paulo: CETESB, 2016.

COCÂRŢĂ, D. M.; MARINESCU, F.; SIMONESCU, C. M. **Heavy metals determination and fractionation in soils and sediments: methodological aspects and case studies.** Environmental Engineering and Management Journal, v. 15, p. 913-925, 2016.

COGERH – **COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS**. Sub-bacia hidrográfica do Salgado: caracterização. Fortaleza: COGERH, 2019.

CONAMA – C**onselho Nacional do Meio Ambiente.** Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas. Diário Oficial da União, Brasília, 2009.

CPRM – **SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL.** Atlas Geoquímico do Estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2016.

CORRÊA, M. M.; SILVA, F. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. G.S. **Valores de referência para metais em solos da bacia do rio Jaboatão, Pernambuco**. Mix Sustentável, 2024.

Costa, Amini Ferreira da. **Análise de risco à saúde humana por uso do solo contaminado por chorume na área do lixão de Maceió** / Amini Ferreira da Costa._ 2021. 103 f : il, color.

DONG, W.; ZHANG, Y.; WHAG, H.;CHEN, J. **Effects of chelating agents addition on ryegrass extraction of cadmium and lead in artificially contaminated soil**. Water, v. 15, n. 10, p. 1929, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/w15101929.

FADIGAS, F. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C.; FREIXO, A. A. **Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, p. 151-160, 2006. ResearchGate

FERNÁNDEZ, A. J.; RAMOS, E. J.; MARTÍNEZ, J. L. **Advances in sample preparation for atomic absorption spectrometry: environmental applications.** Microchemical Journal, v. 169, 2021.

FESZTEROVÁ, M.; KOWALSKA, M.; HUDEC, M. **Assessing the Impact of Soil Humic Substances, Textural Fractions on the Sorption of Heavy Metals (Cd, Pb). Applied Sciences**, v. 14, n. 7, art. 2806, 2024. DOI: 10.3390/app14072806.

HATJE, V.; BARROS, F. **Metal contamination in aquatic sediments: geochemical behavior and environmental implications.** Revista Brasileira de Geoquímica, 2020.

https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/18059

HELENE, L. P. I. **Diagnóstico ambiental de solo contaminado por cromo de curtume em Motuca (SP) por métodos geofísicos**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

HU, X.; LIU, Y.; ZHANG, J. WHANG, L CHEN, Y. **Redox behavior of manganese in aquatic environments.** Environmental Research, 2024.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants.** 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

KOKKINOS, E.; KATSAROU, V.; KARAGEORGIOU, D.; SAMARA, C. **Comparison of digestion methods for trace metals determination in sediments by GFAAS**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 190, 2018.

LAJUNEN, L. H. J.; PERÄMÄKI, P. **Spectrochemical analysis by atomic absorption and emission.** 2. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2004.

MANDAL, B. K.; SUZUKI, K. T. **Speciation of chromium in soil and sludge: influence of organic matter on chromium mobility**. Journal of Hazardous Materials, v. 187, p. 91–97, 2011.

MARTINS, T. S. **Impactos químicos e ecológicos de metais pesados em solos do Ceará.** Tese (Doutorado). UFC, 2024.

Naseri, K. HOSSEINI, S. M.; GHORBANI, H. (2020). **Health risk assessment of cadmium exposure in contaminated soils.** Environ. Monit. Assess.

NUNES, L. M.; SILVA,F. J. A.; BRITO, M.G. S.L.; ARAUJO, A. O.; MENDONÇA, L. A.R. **Assessment of heavy metal contamination in sediments from a tropical watershed using AAS**. Environmental Monitoring and Assessment, v. 194, 2022.

OLAWADE, D.; ADEBAYO, A.;OLADIPO,O.; ADEOLA, O. **Biogeochemical cycling of manganese in aquatic systems**. Environmental Chemistry Letters, 2024.

OLIVEIRA, Cícero Gomes. **Estações de tratamento de efluentes de atividades de alto potencial poluidor degradador: uma análise do atendimento a condicionantes legais.** 2023. 69 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional Sustentável) – Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade, Universidade Federal do Cariri, Crato, 2023.

OLIVEIRA, R. C. B. **Metais em solos e sedimentos estuarinos e sua significância ambiental.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Repositório UFC

PANQING, H.; LI, Z.; WANG, Y.; ZHANG,Q.; LIU, X. **Probabilistic health risk assessment of heavy metals in soils from Xinjiang, China: Monte Carlo simulation approach. Ecotoxicology and Environmental** Safety, v. 257, 2023.

QUEIROZ, A. F. S.; SOUZA, E. S. **Comportamento geoquímico de metais em sedimentos de rios do semiárido brasileiro**. Química Nova, 2021.

RAMIRES, Paula Florencio. **Avaliação de risco à saúde humana de elementos traços em solos de áreas com diferentes perfis de contaminação**. 2021.109 f. Tese (Doutorado Ciências da Saúde)-- Universidade Federal de Rio Grande.

RIBANI, M.; BOTTOLI, C. B. G.; COLLINS, C. H.; JARDIM, I. C. S. F.; MELO, L. F. C. **Validação em métodos cromatográficos e eletroforéticos.** Química Nova, v. 27, n. 5, p. 771-780, 2004.

SÁ, B. T. C. E.; MOREIRA, P. B. A.; MEIRELES, A. C. M.; BRITO, M. G. S. L. **Qualidade ambiental de riachos no nordeste brasileiro e alternativas às paisagens de rios urbanos: revisão**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 10, p. 599–613, 18 dez. 2021.

SIBIYA, N. NIKOSI,V.; MAPHOSA,M.;DLAMINI, T. **Heavy metals dynamics in river sediments**. Journal of Environmental Management, 2024.

SILVA, C. J. C.; BRITO, A. S.; BRITO, M. G. S. L.; ARAUJO, A. O.; MENDONÇA, L. A. R.; SILVA, F. J. A.; BARBOSA, H. T**. Estudo dos mecanismos de retenção de metais pesados em sedimentos de leitos de rios e de lagoas em aluviões de bacias sedimentares areníticas.** International Journal of Environment and Pollution Research, v. 10, n. 3, p. 39–55, 2022.

SILVA, J. S.; OLIVEIRA,F.;SANTOS, J.R.;COSTA,R.A. **Elementos-traço em sedimentos do Nordeste semiárido: padrões de mobilidade e retenção**. Cadernos de Geociências, 2018.

SILVA, M. de Lima; OLIVEIRA,R.S.; SOUZA, E. S.; BRITO, A.S. **Caracterização de argilas provenientes de indústria de cerâmica vermelha localizada no Cariri-CE**. Research, Society and Development, 2021.

SILVA, M. de Lima; et al. **Caracterização de solo do Cariri Cearense destinado ao cultivo orgânico**. Research, Society and Development, 2021. Disponível em: (link). Acesso em: 20 fev.

SILVA, S. R. et al. **Geologia médica no Brasil: revisão sistemática sobre contaminação por metais.** Terræ Didatica, 2025.

SHETTY, S.; KUMAR, A.;SINGH, R.; SHARMA, P.;GUPTA, V. **Human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils using probabilistic models. Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, 2024.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Princípios de análise instrumental**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

SOUZA, E. S.; QUEIROZ, A. F. S.; SANTOS, J. S.; OLIVEIRA, R. C. **Distribuição vertical de metais pesados em sedimentos do rio Jaguaribe e sua relação com sazonalidade climática**. Journal of Environmental Analysis, 2019.

SOUZA, E. S.; QUEIROZ, A. F. S.; SANTOS, J. S. **Geoquímica de sedimentos em ambientes estuarinos e fluviais do semiárido brasileiro: controle ambiental da mobilidade de metais.** Química Nova, 2019.

SOUZA, H.; LIMA, R. A.; ALVES, P. C.; COSTA, D. S. **Solos e dinâmica ambiental no Nordeste brasileiro**. 2022.

SOUZA, V. L. B.;SANTOS, R.F.; LIMA, M. C.; FERREIRA, A. L. **Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos**. Brazilian Journal of Radiation Sciences, 2015

Sun, J.; LI,H.; ZHANG, Y.; WANG, X.; CHEN, L. **Determination of priority control factors for the management of soil trace metal(loid)s based on source-oriented health risk assessment**. J. Hazardous Mater. 423, 127116 (2022).

TENG, Y.; LIU, J.; ZHANG,X.; WANG, Y.; LI, Z. **Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium(III)**. Environmental Science and Pollution Research, v. 27, p. 30184–30195, 2020.

USEPA – **United States Environmental Protection Agency. Framework for Metals Risk Assessment.** Washington, DC: Office of the Science Advisor, 2007.

USEPA - Exposure factors handbook: 2011 edition. National Center for Environmental Assessment Washington, DC. 2011.

VASCONCELOS, E. S. A. G.; SILVA, F.B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S. **Valores naturais de metais em solos da região semiárida brasileira**. Revista Delos, 2024.

ZHANG, Y.; LI, X.; WANG,H.; CHEN,J.; LIU,Z. **Mobility of manganese under redox conditions in sediments**. Science of the Total Environment, 2023.

WELZ, B.; SPERLING, M. **Atomic Absorption Spectrometry**. 3. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 1999.

WHO – **World Health Organization. Exposure to arsenic: a major public health concern. Geneva:** WHO, 2010.

8 PERSPECTIVAS DE INVESTIGAÇÕES FUTURAS

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam a complexidade dos processos que controlam a distribuição e o comportamento dos metais traços nos solos da região do Cariri cearense, indicando a necessidade de aprofundamento de investigações complementares. Estudos futuros podem ampliar a compreensão da dinâmica ambiental desses elementos por meio da inclusão de um maior número de pontos de amostragem e campanhas realizadas em diferentes períodos sazonais, de modo a avaliar a influência das variações climáticas e hidrológicas sobre a mobilidade e a acumulação dos metais.

A realização de análises de especiação química dos metais constitui uma etapa fundamental para elucidar as formas químicas predominantes e sua biodisponibilidade, permitindo uma avaliação mais precisa dos riscos ambientais e à saúde humana. Associado a isso, a aplicação de métodos de extração sequencial pode fornecer informações detalhadas sobre a distribuição dos metais nas diferentes frações do solo, contribuindo para a identificação de fases geoquímicas responsáveis por sua retenção ou mobilização.

Investigações futuras também podem incorporar parâmetros físico-químicos adicionais, como carbono orgânico total, carbono lábil, capacidade de troca catiônica, granulometria e potencial redox, visando estabelecer correlações mais robustas entre essas variáveis e os índices geoquímicos utilizados. A integração desses dados com ferramentas estatísticas multivariadas e técnicas de geoprocessamento permitiria uma interpretação espacial mais detalhada e a identificação de áreas prioritárias para monitoramento e intervenção ambiental.

Outra perspectiva relevante consiste na ampliação do conjunto de metais avaliados e na utilização de técnicas analíticas de maior sensibilidade, como ICP-MS, possibilitando a detecção de elementos em níveis traço e ultratraço. Além disso, a incorporação de avaliações ecotoxicológicas e de risco à saúde humana, com base em modelos reconhecidos internacionalmente, pode fornecer subsídios adicionais para a tomada de decisão por órgãos ambientais e gestores públicos.

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de estudos voltados à remediação ambiental, avaliando a eficiência de estratégias químicas, físicas ou biológicas para a redução da mobilidade e da biodisponibilidade dos metais nos ambientes impactados. Nesse contexto, a investigação do uso de agentes quelantes, materiais adsorventes naturais e técnicas de fitorremediação pode representar uma alternativa viável e sustentável para a mitigação dos impactos ambientais identificados.

9 ANEXOS:

Anexo 1: Termo de Autorização para Publicação de Teses e Dissertações Eletrônicas

Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação abaixo identificada, autorizo à Universidade Regional do Cariri – URCA, a disponibilizar por tempo indeterminado ao alcance do público a obra abaixo citada, através do site http://bdtd.ibict.br/bdtd/, bem como da rede mundial de computadores – Internet, sem pagamento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, conforme permissões assinaladas, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data, atendendo à Portaria Nº 13 de 15/02/2006 da CAPES.

<table>
<tr><td colspan="2">Identificação do Material Bibliográfico:</td><td>(x) Dissertação</td><td>( ) Tese</td></tr>
<tr><td colspan="4">Autor: Ligia Maria da Silva</td></tr>
<tr><td colspan="2">CPF: 067.891.423-04</td><td colspan="2">RG: 2007965058-3</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nacionalidade: Brasileira</td><td colspan="2">Estado Civil: Casada</td></tr>
<tr><td colspan="4">Endereço Completo: Rua maestro azul, 22ª , Vila alta</td></tr>
<tr><td>CEP: 63119370</td><td>Cidade: Crato</td><td colspan="2">Estado: Ce</td></tr>
<tr><td>Fone/Celular: (88)99403-5612</td><td colspan="3">E-mail: ligia.silva@urca.br</td></tr>
<tr><td colspan="4">Título: AVALIAÇÃO DOS RISCOS AMBIENTAL E CARCINOGÊNICO ASSOCIADOS A METAIS TRAÇO EM SOLOS DO LEITO DO RIO SALGADO NO CARIRI CEARENSE.</td></tr>
<tr><td colspan="4">Orientador: Ligia Cláudia Castro de Oliveira</td></tr>
<tr><td colspan="4">Coorientador: Francisco Alixandre Ávila Rodrigues</td></tr>
<tr><td colspan="4">Membros da Banca: Francisco José de Paula Filho; Maria Karollyna do Nascimento Silva Leandro; Roseli Barbosa; Jorge Marcell Coelho Menezes.</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>Data da Defesa: 05/02/2026</td><td colspan="3">Curso: Programa de Pós-graduação em Química Biológica</td></tr>
<tr><td colspan="4">Área do Conhecimento: Química Ambiental</td></tr>
<tr><td colspan="4">Palavras-Chave: metais traço; FAAS; solos; sedimentos fluviais, Avaliação de risco à saúde humana.</td></tr>
<tr><td colspan="4">3. Agência de Fomento:</td></tr>
<tr><td colspan="2">Informações de Acesso ao Documento: para publicação</td><td>(x) Acesso Total</td><td>( ) Acesso Parcial</td></tr>
<tr><td colspan="4">Em caso de publicação parcial, especifique o(s) arquivo(s) e/ou capítulo(s) restrito(s):</td></tr>
</table>

Crato, _____de _____de _____

Havendo concordância com a publicação eletrônica enviamos o(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação gerada a partir da versão final corrigida e aprovada pelo Orientador. A restrição (parcial ou total) poderá ser mantida por até dois anos a partir da data de autorização da

publicação sob responsabilidade do Programa. A extensão deste prazo demandará justificativa formal apresentada e será comunicada à CAPES.

Assinatura do Autor: Assinatura do Orientador:

Anexo 2

Tabela -Índice de geoacumulação :

	Indice de geoacumulação							
	BATATEIRAS		ESTABILIZAÇÃO		MACACOS		CARÁS	
	média	dp	média	dp	média	dp	média	dp
Cu	-1,268	0,140	-1,006	0,106	-1,952	0,086	-0,998	0,031
Cr	-2,635	0,098	-1,002	0,115	-2,120	0,051	-1,142	0,007
Ni	-1,670	0,108	-1,605	0,101	-2,167	0,033	-0,249	0,016
Mn	-2,878	0,090	-3,264	0,084	-3,990	0,030	-0,793	0,053
Co	-0,428	0,078	-0,670	0,032	-1,065	0,088	0,547	0,029
Zn	0,720	0,103	1,099	0,158	0,096	0,203	-0,828	0,281
Fe	-4,907	0,156	-4,237	0,132	-3,170	0,272	-4,044	0,176

Tabela de Fator de contaminação

	Fator de contaminação							
	BATATEIRAS		ESTABILIZAÇÃO		MACACOS		CARÁS	
	média	dp	média	dp	média	dp	média	dp
Cu	0,623	0,063	0,747	0,057	0,388	0,024	0,751	0,016
Cr	0,241	0,017	0,749	0,062	0,345	0,013	0,680	0,003
Ni	0,472	0,037	0,493	0,036	0,334	0,008	1,262	0,014
Mn	0,204	0,013	0,156	0,009	0,094	0,002	0,866	0,032
Co	1,115	0,062	0,943	0,021	0,717	0,045	2,192	0,045
Zn	2,471	0,182	3,212	0,372	1,603	0,242	0,845	0,182
Fe	0,050	0,006	0,080	0,008	0,167	0,035	0,091	0,012

Tabela - Índice de carga poluente								
BATATEIRAS		ESTABILIZAÇÃO		MACACOS		CARÁS		
média	dp	média	dp	média	dp	média	dp	
0,411	0,032	0,521	0,036	0,362	0,021	0,713	0,022	

Anexo 3:

Artigo 1 – "Remediation of soils contaminated by toxic metals: a review of sources, impacts and analytical techniques".

ABSTRACT

The contamination of soils and sediments by toxic metallic elements, such as lead, cadmium, mercury, chromium, and arsenic, constitutes a persistent environmental problem, intensified by industrial, agricultural, and mining activities. These elements, due to their toxicity, persistence, and bioaccumulation capacity, pose direct risks to human

health and compromise the integrity of ecosystems. This study aimed to review the literature on detection and assessment strategies for contamination by these contaminants, with an emphasis on modern analytical techniques such as ICP-MS, AAS, and XRF, as well as to explore the importance of physicochemical parameters pH, total carbon, organic carbon, and labile carbon that influence their mobility and bioavailability in sediments. The bibliometric analysis conducted with the VOSviewer software allowed for the identification of the most recurring themes and highlighted methodological gaps, especially in tropical and semi-arid regions. The results reinforce the need for interdisciplinary approaches that integrate geochemical data, multielement analysis, and statistical tools, aiming for a more precise environmental diagnosis and the development of sustainable remediation strategies, with a focus on vulnerable areas such as the Salgado River basin in the Cariri region of Ceará.

Keywords: toxic metals, soil contamination, remediation, analytical techniques, spectrometry.

RESUMO

A contaminação de solos e sedimentos por elementos metálicos tóxicos, como chumbo, cádmio, mercúrio, cromo e arsênio, constitui um problema ambiental persistente, intensificado por atividades industriais, agrícolas e mineradoras. Esses elementos, devido à sua toxicidade, persistência e capacidade de bioacumulação, representam riscos diretos à saúde humana e comprometem a integridade dos ecossistemas. Este estudo teve como objetivo revisar a literatura sobre as estratégias de detecção e avaliação da contaminação por esses contaminantes, com ênfase em técnicas analíticas modernas, como ICP-MS, FAAS e XRF, além de explorar a importância de parâmetros físico-químicos pH, carbono total, carbono orgânico e carbono lábil que influenciam sua mobilidade e biodisponibilidade nos sedimentos. A análise bibliométrica realizada com o software VOSviewer permitiu

identificar os temas mais recorrentes e apontar lacunas metodológicas, especialmente em regiões tropicais e semiáridas. Os resultados reforçam a necessidade de abordagens interdisciplinares que integrem dados geoquímicos, análises multielementares e ferramentas estatísticas, visando um diagnóstico ambiental mais preciso e o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de remediação, com destaque para áreas vulneráveis como a bacia do Rio Salgado, no Cariri cearense.

Palavras-chave: metais tóxicos, contaminação do solo, remediação, técnicas analíticas, espectrometria.

RESUMEN

La contaminación de suelos y sedimentos por elementos metálicos tóxicos como plomo, cadmio, mercurio, cromo y arsénico es un problema ambiental persistente, intensificado por las actividades industriales, agrícolas y mineras. Estos elementos, debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación, representan riesgos directos para la salud humana y comprometen la integridad de los ecosistemas. Este estudio tuvo como objetivo revisar la literatura sobre estrategias para detectar y evaluar la contaminación por estos contaminantes, con énfasis en técnicas analíticas modernas como ICP-MS, AAS y XRF, además de explorar la importancia de los parámetros fisicoquímicos pH, carbono total, carbono orgánico y carbono lábil que influyen en su movilidad y biodisponibilidad en sedimentos. El análisis bibliométrico realizado con el software VOSviewer nos permitió identificar los temas más recurrentes y señalar lagunas metodológicas, especialmente en regiones tropicales y semiáridas. Los resultados refuerzan la necesidad de enfoques interdisciplinarios que integren datos geoquímicos, análisis multielementales y herramientas estadísticas, buscando un diagnóstico ambiental más preciso y el desarrollo de estrategias de remediación sostenibles, con énfasis en áreas vulnerables como la cuenca del río Salgado, en Cariri, Ceará.

Palabras clave: metales tóxicos, contaminación del suelo, remediación, técnicas analíticas, espectrometría.

1 INTRODUÇÃO

A contaminação de solos e sedimentos por metais pesados, como chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), cromo (Cr) e arsênio (As), configura-se como um

problema ambiental persistente, resultante principalmente de atividades antrópicas como mineração, industrialização, práticas agrícolas intensivas e deposição atmosférica (WEI *et al.,* 2020).

Esses metais são caracterizados por sua resistência à degradação, elevada solubilidade em ambientes ácidos e forte afinidade por partículas orgânicas e minerais, o que lhes confere significativa mobilidade e potencial de bioacumulação. A exposição contínua aos elementos metálicos com alta densidade pode desencadear processos de biomagnificação, afetando a cadeia trófica e promovendo alterações fisiológicas, genéticas e reprodutivas em organismos terrestres e aquáticos (GUO *et al.,* 2021; KHAN *et al.,* 2018). Em estudo recente, destacam que a exposição crônica ao cádmio está associada a nefro malformações, disfunções endócrinas e potencial carcinogênico, com efeitos modulados pela duração da exposição e vulnerabilidade individual (Chu *et al.,* 2025).

No contexto ambiental, a presença desses contaminantes compromete a fertilidade do solo, a qualidade da água e a segurança alimentar, ao afetar diretamente a microbiota, a vegetação e a fauna aquática (AL- KHOUD et al., 2025). Tais impactos negativos reforçam a necessidade de estratégias de monitoramento e remediação ambiental eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis.

Avanços recentes nas técnicas analíticas têm ampliado a capacidade de detecção e quantificação de elementos traços em diversos tipos de matrizes. Métodos como espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) e espectrometria de absorção atômica (AAS) destacam-se por sua elevada sensibilidade, seletividade e capacidade de análise multi elementar (ZHAO *et al.,* 2022; NAWAR & EISSA, 2020). Essas tecnologias têm sido fundamentais na caracterização de áreas contaminadas, permitindo um diagnóstico preciso e subsidiando ações de mitigação.

Contudo, ainda persistem lacunas na compreensão integrada dos fatores físico-químicos do solo como pH, carbono total, carbono orgânico e carbono lábil (fração de carbono rapidamente degradável) que influenciam a mobilidade e biodisponibilidade dos metais. Investigar esses parâmetros é crucial para elucidar os mecanismos de retenção e liberação desses contaminantes em ambientes sedimentares, sobretudo em regiões ecologicamente vulneráveis e de relevância socioambiental.

1.1 Objetivo do Trabalho

O trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a contaminação de solos e sedimentos por elementos metálicos com alta densidade e toxicidade, com ênfase:

- Nos métodos analíticos modernos aplicados à detecção de elementos traço, especialmente a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS);
- Na importância de parâmetros físico-químicos como pH, carbono total, carbono orgânico e carbono lábil na mobilidade e biodisponibilidade dos metais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A quantificação precisa de metais pesados em solos e sedimentos é essencial para a avaliação ambiental, sendo amplamente discutida na literatura científica por diversos autores como (ALMEIDA *et al.,* 2023; ZHAO *et al.,* 2022; NAWAR & EISSA, 2020; GARDEA-TORRESDEY *et al.,* 2020). As técnicas mais utilizadas incluem a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), a espectrometria de absorção atômica (AAS) e, em algumas abordagens, a fluorescência de raios X (XRF). Essas técnicas se destacam por sua sensibilidade, seletividade e capacidade de fornecer dados confiáveis em concentrações traços (GOMES *et al.,* 2020).

O ICP-MS é atualmente considerado a técnica mais sensível para a detecção simultânea de múltiplos metais traços em matrizes ambientais complexas. A técnica baseia-se na ionização dos elementos por um plasma de argônio e posterior separação dos íons por um espectrômetro de massas, permitindo a detecção em níveis de $ng \cdot L^{-1}$ (ZHAO *et al.,* 2022; MIMURA *et al.,* 2016). Segundo Gardea-Torresdey *et al.,* (2020), o ICP-MS apresenta vantagens analíticas como alta taxa de amostragem, análise multielementar e baixos limites de detecção, o que o torna ideal para o monitoramento de áreas contaminadas.

Niazi *et al.,* (2020) ressaltam a eficiência do ICP-MS na detecção de Cd, Pb, Cr e Hg em solos e sedimentos; além disso, Dong *et al.,* (2023) enfatizam que sua associação com a digestão ácida é fundamental para recuperar metais em áreas com histórico industrial ou minerador. Por outro lado, a AAS, embora limitada na análise multielementar, permanece relevante pela simplicidade e confiabilidade, sendo particularmente indicada para a determinação individual de metais em baixas

concentrações, sobretudo em laboratórios com infraestrutura reduzida (Silva *et al.,* 2019; Sharma *et al.,* 2021).

Em estudos realizados por PROTANO e NANNONI (2018), a AAS foi utilizada para monitorar áreas contaminadas por mineração, demonstrando resultados satisfatórios na quantificação de arsênio, mercúrio e chumbo em solos superficiais.

Nesse contexto, destaca-se também o uso da XRF, uma técnica analítica não destrutiva que vem ganhando relevância em estudos voltados para a triagem rápida de elementos metálicos com alta densidade e toxicidade. A XRF permite análises diretas de amostras sólidas, reduzindo significativamente o tempo de preparo (JIANLONG HU *et at.,* 2022). Embora sua sensibilidade seja inferior à do ICP-MS, autores como (AKBAR, ELSAGH *et al.,* 2021) ressaltam sua utilidade em investigações preliminares e em cenários onde se observam concentrações mais elevadas de contaminantes.

Além disso, a XRF apresenta vantagens adicionais devido ao seu caráter portátil e à possibilidade de aplicação in situ, o que a torna especialmente indicada para campanhas de campo em áreas remotas ou de difícil acesso. Esse potencial foi evidenciado por RODRÍGUEZ *et al.,* (2020), que empregaram a técnica em análises geoquímicas realizadas no norte da África.

De maneira geral, a escolha da técnica analítica depende da finalidade do estudo, da matriz ambiental, da sensibilidade necessária e dos recursos disponíveis. Conforme GIGER *et al.,* (2018), para estudos que requerem precisão elevada e rastreamento de contaminação em níveis traços, o ICP-MS é o método mais indicado. No entanto, como ressaltado por SILVA *et al.,* (2024) e RAFIQUE *et al.,* (2022), a integração de diferentes técnicas, como ICP-MS e AAS, pode oferecer uma abordagem mais robusta, especialmente quando aliada a uma caracterização físico-química detalhada dos sedimentos.

2.1 Parâmetros físicos químicos

A análise de parâmetros físico-químicos como o pH e a matéria orgânica total (MOt) nos sedimentos é fundamental para compreender a dinâmica de contaminação por elementos traços. Estudos realizados no estuário do rio Coreaú demonstraram que o pH da água se manteve dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005, variando entre 6,5 e 8,5, o que, conforme os autores, pode favorecer o crescimento de microrganismos patogênicos em ambientes levemente básicos (OLIVEIRA *et al.,* 2021).

Esse comportamento do pH é relevante para pesquisas em ambientes sedimentares como o Rio Salgado, visto que a solubilidade e a mobilidade de metais pesados são altamente influenciadas pela variação do pH. Em ambientes com pH próximo à neutralidade, muitos metais podem se encontrar em formas mais biodisponíveis, potencializando riscos ambientais e à saúde pública.

Além disso, os autores observaram que a matéria orgânica total no sedimento foi significativamente maior nas margens urbanizadas do rio Coreaú, o que foi associado ao descarte de efluentes domésticos e restos de pescado (OLIVEIRA *et al.,* 2021). Tal evidência reforça a importância de se quantificar parâmetros como carbono total e carbono orgânico nos sedimentos do Rio Salgado, pois a presença de matéria orgânica pode atuar como agente complexante, alterando a retenção, mobilidade e biodisponibilidade de elementos traços.

A avaliação de parâmetros físicos e químicos dos sedimentos constitui uma etapa fundamental nos estudos de contaminação por elementos traço, pois permite compreender os processos que controlam a retenção, mobilidade e biodisponibilidade dos contaminantes no ambiente aquático (ZHANG *et al.,* 2014; PEPLINSKA *et al.,* 2020). Entre os principais parâmetros analisados destacam-se o pH e o carbono total, cujos efeitos são amplamente reconhecidos na geoquímica de metais pesados (Sathyanarayanan *et al.,* 2024). Esses fatores influenciam diretamente a mobilidade metálica e os riscos ecológicos, reforçando sua presença na literatura mais recente.

O pH do meio exerce influência direta na solubilidade, especiação e mobilidade dos metais em sedimentos. Em condições ácidas, muitos desses elementos apresentam maior solubilidade, aumentando sua biodisponibilidade e toxicidade, enquanto valores neutros ou levemente alcalinos tendem a favorecer processos de adsorção ou precipitação nos óxidos e na matéria orgânica presentes, diminuindo sua mobilidade (PEPLINSKA et al., 2020; SATHYANARAYANAN et al., 2024; BASTI et al., 2024).

O carbono total (CT), inclusive frações como o carbono orgânico total (COT) e o carbono lábil (CL), é um indicador crucial da matéria orgânica disponível nos sedimentos, influenciando diretamente a complexação e imobilização de metais pesados (BASTI *et al.,* 2024; SRADHANJALI *et al.,* 2025). Essas frações de carbono, especialmente as de rápida decomposição, determinam a mobilidade metálica ao formar complexos estáveis com cátions metálicos, alterando sua biodisponibilidade e transporte no ambiente (BASTI *et al.,* 2024).

Estudos como o de Peplinska *et al.,* (2020) demonstraram que altos teores de carbono orgânico nos sedimentos contribuem significativamente para a retenção de metais como cádmio, chumbo e zinco, especialmente em áreas impactadas por esgoto doméstico e atividades urbanas. Esses dados encontram suporte em FESZTEROVÁ *et al.,* (2024), que reforçam a importância das frações húmicas dos sedimentos na formação de complexos estáveis com íons metálicos, regulando a mobilidade dos contaminantes.

Portanto, a análise de parâmetros como pH e carbono total torna-se imprescindível para a interpretação dos processos geoquímicos que regulam o comportamento dos elementos traços nos sedimentos do Rio Salgado, especialmente em regiões sujeitas a impactos antrópicos. Esses dados fornecem subsídios para a avaliação do risco ambiental e o planejamento de medidas de mitigação.

2.2 Estudos de caso e aplicações práticas

A análise geoquímica de sedimentos é amplamente reconhecida como uma ferramenta eficaz para rastrear fontes de contaminação por metais pesados em ambientes aquáticos. No contexto da bacia hidrográfica do Rio Salgado, estudos preliminares apontam que os níveis de elementos como chumbo (Pb), cádmio (Cd) e cobre (Cu) estão fortemente associados a descargas industriais, disposição inadequada de resíduos e ao uso intensivo de agroquímicos (SILVA *et al.,* 2021; OLIVEIRA *et al.,* 2021). A identificação dessas fontes é essencial para o desenvolvimento de estratégias regionais de monitoramento e mitigação ambiental.

O uso combinado de técnicas espectrométricas (ICP-MS, AAS) e de fluorescência de raios X (XRF) tem sido reportado em diversas regiões do Brasil e do mundo como altamente eficaz na avaliação da contaminação em sedimentos. Em estudos conduzidos por GOMES *et al.,* (2020) e AKBAR ELSAGH *et al.,* (2021), a XRF mostrou-se eficiente para triagens rápidas e em campo, enquanto o ICP-MS foi utilizado para quantificação precisa de metais traço em laboratório, demonstrando sinergia entre os métodos. No Rio Doce, por exemplo, após o rompimento da barragem de Fundão (MG), GONTIJO *et al.,* (2019) aplicaram ICP-MS para rastrear a distribuição de As, Hg e Fe nos sedimentos, evidenciando a eficácia da técnica na caracterização pós-desastre.

Segundo Almeida *et al.,* (2023), a integração dessas técnicas com estudos de bioacumulação em organismos aquáticos, como moluscos e peixes, permite inferir sobre a biodisponibilidade dos metais, agregando valor ecológico aos dados químicos. Essa abordagem tem sido adotada com sucesso em rios contaminados na

Colômbia (ARGUMEDO & DÓRIA, 2021) e no sul da China (GUO *et al.,* 2021), onde espécies indicadoras foram usadas para avaliar o risco ecológico real

As condições redox, o pH e a composição mineralógica dos sedimentos são fatores cruciais para a retenção ou mobilização dos metais. Estudos de Santos *et al.,* (2022) mostraram que, em solos tropicais brasileiros, a presença de óxidos de ferro e alumínio contribui significativamente para a adsorção de Cd e Pb, reduzindo sua biodisponibilidade. Esse comportamento também foi reportado por Tianli *et al.,* (2019), que evidenciaram que a matéria orgânica coloidal afeta a mobilidade do cobre em ambientes estuarinos.

Além disso, diversos autores têm demonstrado que áreas com ocupação urbana desordenada, como em sub-bacias do semiárido nordestino, apresentam correlação direta entre carga populacional, ausência de tratamento de esgoto e aumento das concentrações de Zn, Cr e Cu nos sedimentos (RANIBAR JAFARABADI *et al.,* 2020; RODRIGUEZ *et al.,* 2020). Isso reforça a importância de estudos voltados à bacia do Rio Salgado, que possui características semelhantes em termos de vulnerabilidade ambiental e baixa cobertura de saneamento básico.

Em regiões como o Vale do Açu (RN) e o Baixo Jaguaribe (CE), as aplicações de análises multivariadas têm permitido distinguir entre fontes naturais e antrópicas de metais, sendo útil na priorização de áreas para remediação (COSTA *et al.,* 2017). Métodos estatísticos como PCA (Análise de Componentes Principais) e HCA (Análise de Agrupamento Hierárquico) têm sido aliados importantes na interpretação dos dados analíticos.

Portanto, a partir da revisão de casos nacionais e internacionais, evidencia-se que a caracterização completa de metais com potencial de bioacumulação em sedimentos exige não apenas o uso de técnicas analíticas sensíveis, mas também uma abordagem multidisciplinar que inclua análises físico-químicas, estudos ecotoxicológicos e mapeamento espacial.

3 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma revisão integrativa da literatura, de natureza qualitativa e descritiva, cujo objetivo foi reunir, organizar e analisar criticamente publicações científicas sobre a contaminação de solos e sedimentos por metais pesados, os métodos analíticos aplicados à sua detecção, os parâmetros físico-químicos que afetam sua mobilidade e biodisponibilidade, bem como as estratégias de remediação utilizadas. A abordagem metodológica adotada buscou

garantir a abrangência temática, a reprodutibilidade e a confiabilidade científica dos achados.

A construção da revisão seguiu cinco etapas principais foram elas: Definição da pergunta orientadora e dos critérios de seleção; Busca sistematizada nas bases de dados; Seleção dos estudos com base nos critérios de inclusão e exclusão; Extração e categorização das informações relevantes; Análise qualitativa dos dados combinada a uma análise bibliométrica exploratória.

A busca por artigos foi realizada entre janeiro e maio de 2025 nas bases Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, SciELO e Google Scholar, utilizando os seguintes critérios, publicações entre 2010 e 2025; escritas em inglês ou espanhol; indexadas em periódicos revisados por pares.

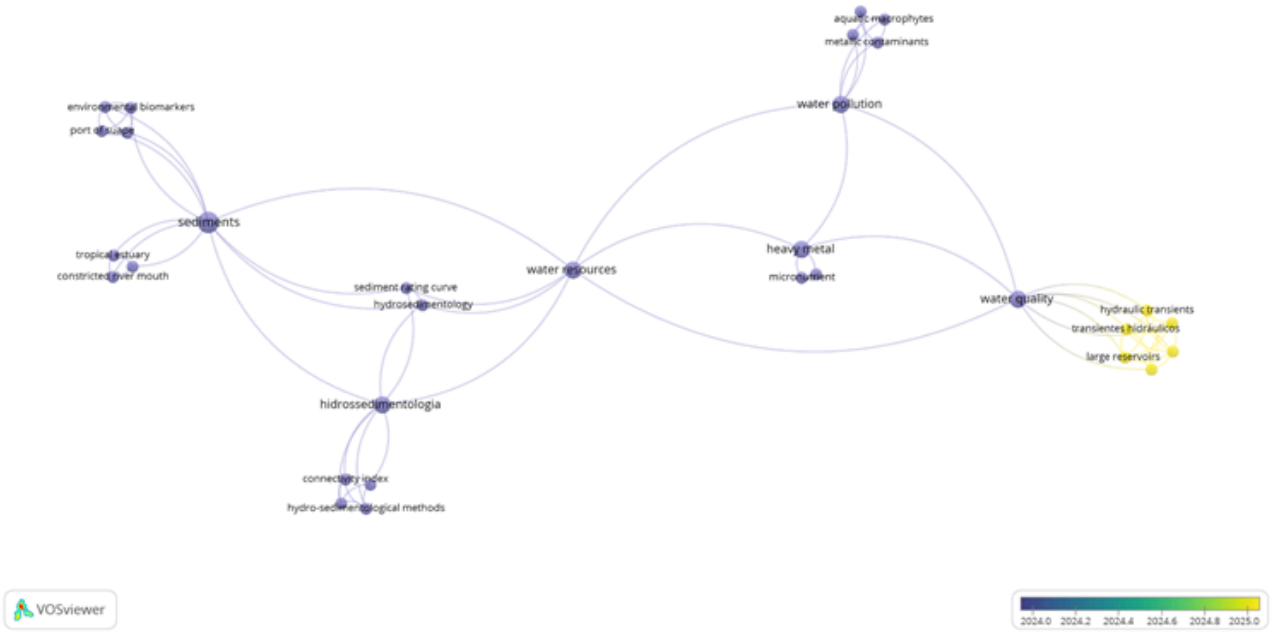
Que abordassem diretamente a contaminação por metais pesados em solos ou sedimentos, as técnicas analíticas de detecção e os parâmetros físico-químicos relacionados (pH, carbono total, carbono orgânico e carbono lábil). Os termos de busca incluíram combinações com operadores booleanos, tais como: Heavy metals AND sediments AND ICP-MS, metal contamination AND soil AND pH, trace elements AND total organic carbon AND bioavailability, XRF AND metal detection AND remediation.

Foram excluídos artigos repetidos entre bases, publicações com dados incompletos, textos opinativos e estudos desvinculados da temática principal. Após o processo de triagem e elegibilidade, 47 artigos foram selecionados para análise aprofundada.

As informações extraídas foram organizadas em planilha eletrônica, contendo os seguintes campos: autores, ano, local do estudo, matriz amostrada, metais analisados, técnica analítica empregada, parâmetros físico-químicos investigados e conclusões principais. Os dados foram organizados segundo as seguintes categorias analíticas: Técnicas de quantificação de metais pesados (ICP-MS, AAS, XRF); Variáveis físico-químicas relacionadas à mobilidade e retenção dos metais; Aplicações práticas em estudos de caso nacionais e internacionais; Estratégias e desafios para a remediação ambiental.

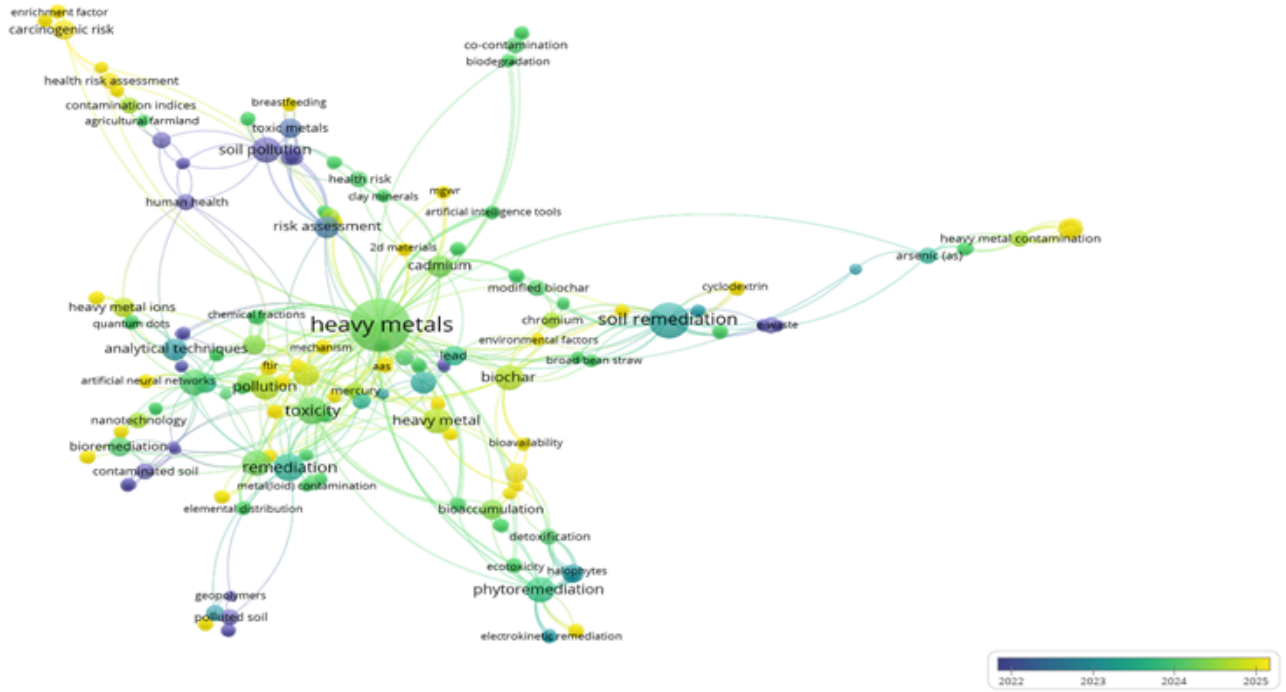
De forma complementar à análise qualitativa, foi aplicada uma análise bibliométrica utilizando o software VOSviewer. O objetivo foi identificar as palavras-chave mais recorrentes e mapear as relações temáticas predominantes nas publicações selecionadas, especialmente aquelas vinculadas à contaminação de sedimentos por metais pesados.

Figura 1: Rede de coocorrência de palavras-chave da SciELO, mostrando conexões entre sedimentos, recursos hídricos, qualidade da água e contaminação.



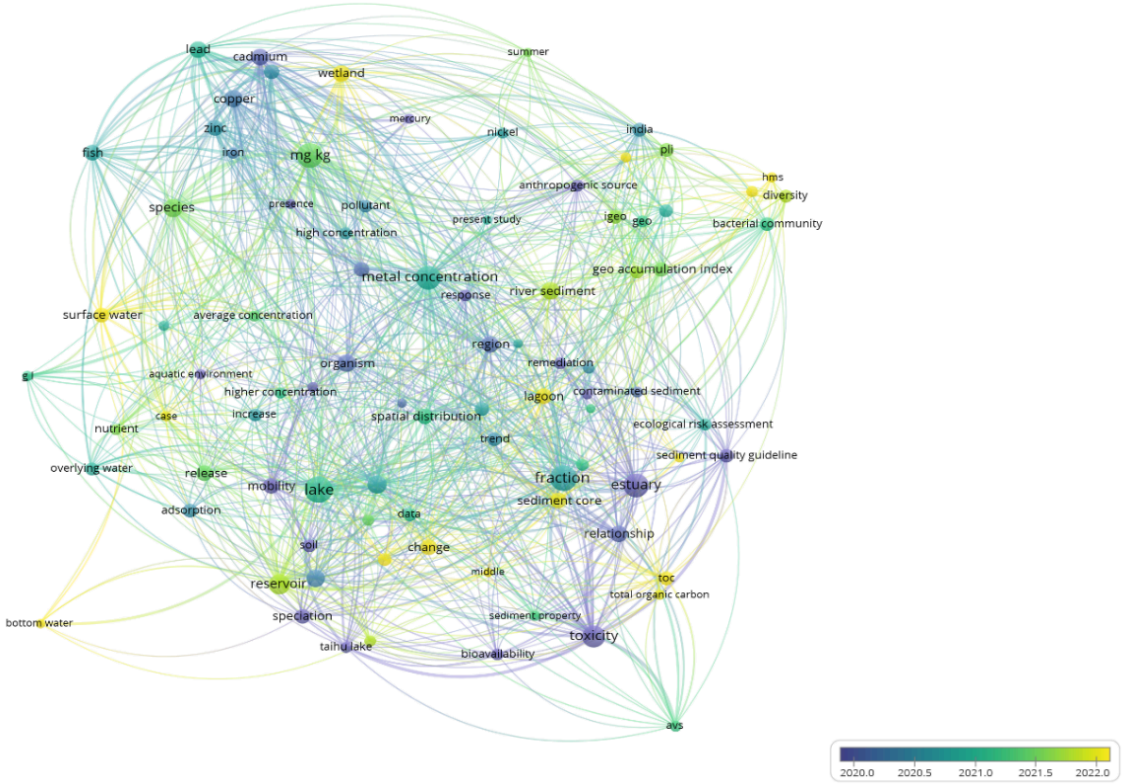
Fonte: Elaborada pelo Software Vosviewer.

Figura 2: Mapa de densidade da ScienceDirect, destacando concentração de metais, biodisponibilidade, toxicidade e riscos ecotoxicológicos.



Fonte: Elaborada pelo Software Vosviewer.

Figura 3: Cluster temático do PubMed, destacando remediação de sedimentos, fitorremediação, técnicas analíticas e avaliação de risco em estratégias sustentáveis.



Fonte: Elaborada pelo Software Vosviewer.

O uso da plataforma permitiu visualizar os termos mais frequentes relacionados à temática (como heavy metals, sediments, remediation, bioavailability, ICP-MS, entre outros); identificar agrupamentos conceituais por meio da análise de coocorrência de palavras-chave; detectar tendências emergentes e possíveis lacunas temáticas, auxiliando no refinamento da discussão e na identificação de eixos pouco explorados.

Os três mapas foram gerados e integrados à análise: Figura 1, rede de coocorrência com foco em sedimentos, hidrossedimentologia, recursos hídricos e qualidade da água, demonstrando os principais domínios interligados ao tema central; Figura 2, mapa de densidade com ênfase em concentração de metais, lago, biodisponibilidade e toxicidade, destacando a complexidade das interações ambientais; Figura 3, cluster temático com destaque para remediação, fitorremediação, técnicas analíticas e avaliação de risco, revelando as estratégias mais recentes de monitoramento e tratamento.

A aplicação do VOSviewer permitiu, portanto, subsidiar a categorização das evidências científicas, fortalecer a interpretação crítica dos resultados e guiar recomendações futuras para a área de estudo.

Já os critérios de exclusão foram, Publicações repetidas entre bases; Artigos de opinião, editoriais ou resumos de eventos sem dados completos; Estudos que tratavam de metais não

classificados como tóxicos prioritários ou que não relacionavam os metais a matrizes sólidas como solos e sedimentos.

A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, permitindo a identificação de padrões, lacunas, convergências e divergências entre os estudos. As informações foram agrupadas conforme as seguintes categorias analíticas: Métodos de quantificação de metais pesados (icp-ms, aas, xrf); Parâmetros físico-químicos (pH, carbono total, carbono orgânico e carbono lábil); Aplicação em estudos de caso no brasil e no exterior; Implicações ambientais e estratégias de remediação.

Entre as principais limitações deste estudo, destaca-se a possível omissão de publicações relevantes não indexadas nas bases selecionadas ou que tenham sido publicadas em idiomas distintos dos critérios adotados. Além disso, a diversidade metodológica dos estudos incluídos pode dificultar comparações diretas entre resultados, sobretudo no que se refere às concentrações de metais e às abordagens estatísticas utilizadas. Ainda assim, as escolhas metodológicas adotadas visam mitigar esses efeitos, mantendo o foco na qualidade e na relevância dos conteúdos analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente revisão integrativa, contemplando 54 estudos publicados entre 2011 e 2025, permitiu delinear um panorama abrangente sobre a contaminação de sedimentos por elementos metálicos tóxicos, com destaque para chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), cromo (Cr) e arsênio (As), cujos impactos ambientais e riscos à saúde humana permanecem expressivos em regiões urbanas, agrícolas e industriais.

Entre as técnicas analíticas avaliadas, a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) destacou-se por sua alta sensibilidade e capacidade de detecção multielementar em níveis traço ($ng \cdot L^{-1}$), sendo amplamente empregada em estudos que demandam precisão e rastreamento detalhado de contaminantes. Entretanto, seu custo elevado e a necessidade de infraestrutura especializada restringem sua adoção em contextos com recursos limitados. A espectrometria de absorção atômica (AAS), por sua vez, manteve-se como alternativa consolidada, sobretudo em laboratórios que priorizam análises seletivas de determinados metais, devido à sua confiabilidade e operacionalidade mais acessível. Já a fluorescência de raios X (XRF) foi apontada como ferramenta estratégica para triagens rápidas e análises in situ, apresentando vantagens em estudos de campo e mapeamentos preliminares, apesar da menor sensibilidade em comparação ao ICP-MS.

No que se refere aos parâmetros físico-químicos, o pH evidenciou influência decisiva sobre a solubilidade e a especiação dos metais, com ambientes ácidos favorecendo a mobilidade dos cátions metálicos e, consequentemente, elevando o risco ecotoxicológico. Em contrapartida, pHs neutros ou levemente alcalinos tendem a estimular a adsorção desses elementos em partículas minerais e na matéria orgânica presente nos sedimentos, contribuindo para sua imobilização temporária. O carbono total, o carbono orgânico e o carbono lábil também desempenharam papel fundamental na dinâmica geoquímica dos metais. O carbono orgânico, em especial, atua como agente quelante natural, formando complexos estáveis com cátions metálicos e reduzindo sua biodisponibilidade. Já o carbono lábil, associado à fração de matéria orgânica mais facilmente degradável, pode alterar o equilíbrio redox do meio, potencializando a liberação de metais antes retidos.

A análise bibliométrica realizada com o software VOSviewer corroborou a importância desses aspectos ao revelar fortes associações entre termos como sediments, heavy metals, bioavailability, water quality e remediation. Os mapas de concorrência indicaram não apenas os eixos clássicos de investigação, mas também tendências emergentes voltadas ao uso de fitorremediação e técnicas estatísticas multivariadas, evidenciando uma transição da simples quantificação para abordagens integradas de mitigação e manejo dos riscos.

Observou-se ainda uma lacuna significativa na literatura referente à integração de dados analíticos com variáveis físico-químicas em ambientes tropicais e semiáridos. Esse ponto é particularmente relevante para regiões como o Cariri cearense e a bacia do Rio Salgado, onde práticas como o uso intensivo de fertilizantes, o lançamento irregular de efluentes e a urbanização desordenada agravam a contaminação dos sedimentos. Nesse sentido, recomenda-se que futuras investigações adotem metodologias interdisciplinares, associando análises multielementares por ICP-MS, XRF e AAS a caracterizações detalhadas de pH e frações de carbono, integrando ainda ferramentas estatísticas e geoespaciais. Essa combinação poderá fornecer diagnósticos ambientais mais robustos e subsidiar políticas públicas voltadas à recuperação de áreas vulneráveis.

5 CONCLUSÃO

A revisão realizada evidenciou o papel central das técnicas analíticas avançadas, como ICP-MS, AAS e XRF, na detecção de elementos metálicos tóxicos em solos e sedimentos, além da influência determinante de parâmetros físico-químicos como pH, carbono total, carbono orgânico e carbono lábil na mobilidade e biodisponibilidade desses contaminantes.

Os mapas construídos no VOSviewer permitiram visualizar conexões entre temas como qualidade da água, bioacessibilidade e estratégias de remediação, destacando tendências atuais e

lacunas relevantes na literatura. Observou-se que, especialmente em regiões tropicais e semiáridas como o Cariri cearense, há carência de estudos que integrem de forma sistemática dados geoquímicos e análises multivariadas.

Nesse contexto, recomenda-se o fortalecimento de abordagens interdisciplinares que combinem análises multielementares, caracterização detalhada dos sedimentos e o uso de ferramentas estatísticas e espaciais, a fim de subsidiar estratégias mais eficazes de monitoramento e remediação ambiental.

AGRADECIMENTOS

Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP. Edital/ chamada: Bolsa de produtividade em pesquisa, estímulo à interiorização e inovação tecnológica - BPI 04/2022. Identificação do processo: BP5-019700179.01.00/22.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. R. et al. Qualidade das águas superficiais na região do Cariri. 2020.

ARAÚJO, A. L. et al. Caracterização geoquímica de argilas da Formação Santana, Cariri. 2018.

BARBOSA, F. T. et al. Metais em solos agrícolas do Cariri associados a insumos agropecuários. 2019.

BRITO, A. S. Avaliação geoquímica de metais no Cariri. Tese (Doutorado). UFPE, 2022.

LIMA, F. P.; SILVA, V. C. Resíduos industriais do polo calçadista do Cariri. 2016.

MAIA, P. R. et al. Fertilizantes fosfatados e contaminação metálica no Ceará. 2017.

MEDEIROS, E. M. et al. Metais em solos agrícolas do Cariri. 2021.

OLIVEIRA, K. R. et al. Riscos ambientais de oficinas metalúrgicas no Cariri. 2020.

SANTOS, A. P. et al. Efluentes da indústria calçadista do Cariri. 2019.

SILVA, C. L. et al. Influência urbana na qualidade da água do Cariri. 2016.

SILVA, F. O.; MELO, D. M. A. Argilas do Araripe: composição geoquímica. 2017.

SOUZA, J. C. et al. Avaliação de resíduos de galvanoplastia no Ceará. 2018.

INCA. Instituto Nacional do Câncer. Estimativa 2023: Incidência de Câncer no Brasil. Rio de Janeiro: INCA, 2022. Disponível em: https://www.inca.gov.br/estimativa/2023 Acesso em: 09 nov. 2025.

SESA-CE. Secretaria da Saúde do Estado do Ceará. Boletim Epidemiológico do Câncer no Ceará – 2022. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2022.Disponível em: https://www.saude.ce.gov.br Acesso em: 09 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Hospital São Vicente de Paulo (Barbalha). Registro Hospitalar de Câncer – Relatório consolidado enviado à SESA-CE (Base RHC/INCA). Barbalha: MS/INCA/SESA-CE, 2017–2022. Disponível em: https://www.inca.gov.br/rhc Acesso em: 09 nov. 2025.

AKBAR ELSAGH, Hamidreza; JALILIAN, Mohammadreza; GHADERI ASLSHABESTARI, Mohammadreza. Avaliação da poluição por metais pesados em sedimentos costeiros de Bandar Abbas, Golfo Pérsico, Irã: Poluição por mercúrio e índices geoquímicos ambientais. **Marine Pollution Bulletin**, v. 167, 2021. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112353

AL-KHOUD, A. et al. Metal contamination – a global environmental issue: impacts on soil fertility, water quality, food safety, microbial diversity, vegetation, and aquatic fauna. **RSC Advances**, v. 15, p. 1–15, fev. 2025. doi:10.1039/D4RA04639K

ALMEIDA, P. H.; FREITAS, R. A.; SOUZA, M. T. Application of spectrometric and chromatographic techniques in the detection of toxic metals in river sediments. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 1, p. 97-105, 2023.

BASTI, S. et al. Impact of organic carbon forms on heavy metals of river sediments and aquatic ecosystems: a review. **Environmental Earth Sciences**, 2024.

BASTI, S. et al. Impact of organic carbon forms on heavy metals of river sediments and aquatic ecosystems: a review. **Environmental Earth Sciences**, v. 83, 2024.DOI:https://doi.org/10.1007/s12665-024-11248-6

BRAGA DA ROSA, M. D.; KIST, L. T.; MACHADO, Ê. L. Aplicação de processo fotocatalítico homogêneo para degradação de fenóis em amostra aquosa. **Revista Jovens Pesquisadores**, v. 3, n. 2, 2013. Disponível em: https://online.unisc.br/seer/index.php/jovenspesquisadores/article/view/4093.

CAMESELLE, C.; GOUVEIA, S. Electrokinetic remediation for the removal of organic and inorganic contaminants in soils: Fundamentals and applications. **Chemosphere**, v. 183, p. 537-547, 2018.

CAMPOS, T. L. *et al.,* Remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos utilizando processos fotocatalíticos in situ. **Journal of Environmental Science**, v. 54, p. 112-121, 2021.

CHU, L.; WANG, Y.; ZHANG, J.; HUANG, R. Chronic exposure to cadmium and its associations with renal, endocrine and carcinogenic outcomes: insights from a systematic review and meta-analysis. **Frontiers in Public Health,** v. 13, 2025. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1597321

CUKROV, N.; DURN, G.; TERZIĆ, S.; NIKOLIĆ, N. Metal contamination of the Krka River estuary sediments: Anthropogenic impacts and diagenetic processes. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 5, p. 4561-4574, 2024.

DONG, Wen; WANG, Ruichen; LI, Huaien; et al. Effects of chelating agents addition on ryegrass extraction of cadmium and lead in artificially contaminated soil. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1929, 2023. https://doi.org/10.3390/w15101929

Environmental Organic Chemistry. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

FERNANDES, A. R.; SILVA, M. L.; MOREIRA, J. B. Eficiência de fotocatalisadores dopados com cromóforos na degradação de herbicidas em áreas agrícolas. **Environmental Advances**, v. 3, p. 100-110, 2022

FESZTEROVÁ, M.; KOWALSKA, M.; HUDEC, M. Assessing the Impact of Soil Humic Substances, Textural Fractions on the Sorption of Heavy Metals (Cd, Pb). **Applied Sciences**, v. 14, n. 7, art. 2806, 2024. DOI: 10.3390/app14072806

GARCIA JUNIOR, G. C.; BOTTER, E. de A.; MARANHÃO, F. L. Avaliação da durabilidade de processos fotocatalíticos aplicados como pós-tratamentos em substratos de argamassa. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 307–320, 2015. Disponível em: https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/42072.

GARDEA-TORRESDEY, Jorge L.; GAMEZ, Gonzalo; GÓMEZ, Edgar; et al. Recent advances in the analysis of heavy metals using spectrophotometric methods. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 35, n. 4, p. 123–145, 2020.

GIGER, Walter; SCHWARZENBACH, René P.; HOLLIGER, Christof.

GOMES, L. et al. Application of X-ray fluorescence spectroscopy for monitoring heavy metals in contaminated river sediments. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 5, p. 10245-10258, 2020

GUO, G.; ZHOU, Q.; MA, L. Q. Long-term impacts of metal contamination on microbial communities in soils: Molecular evidence from field studies. **Science of the Total Environment**, v. 774, 145768, 2021.

HOU, J.; LIU, X.; ZHANG, J. Enhanced photocatalytic performance of TiO_2 doped with chromophores: Applications in water treatment. **Journal of Environmental Sciences**, v. 85, p. 1–10, 2019.https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134496

HU, Jianlong; WANG, Yuxuan; CHEN, Jun; et al. Removal of heavy metals from sewage sludge by chemical leaching with biodegradable chelator methyl glycine diacetic acid. **Chemosphere**, v. 300, p. 134496, 2022.

KAFIZI, A.; OHTANI, B.; KUDO, A. Photocatalytic activity of visible-light-responsive TiO_2 doped with chromophores. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 128, p. 1–10, 2012.

KHAN, Muhammad Iqbal et al. Impact of heavy metal toxicity on plant growth and metabolism: Advances in understanding and practical applications. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 6, p. 5316-5332, 2018. DOI: 10.1007/s11356-017-0426-3.

KHAN, S.; AFZAL, M.; IQBAL, S.; KHAN, Q. M. Plant–bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. **Chemosphere,** v. 204, p. 99-110, 2018.

LIU, G. *et al.,* Photocatalytic degradation of organic pollutants over TiO_2-based photocatalysts: A review on recent progress. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 147, p. 1–10, 2013.

LIU, J.; ZHAO, Q.; LI, Y.; JIN, H. Enhancing phytoremediation of heavy metals in soils through the combined use of hyperaccumulators and natural chelating agents. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 328-334, 2019.

LUO, L.; MA, Y.; ZHANG, S.; WEI, D.; ZHU, Y. G. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. **Journal of Environmental Management**, v. 218, p. 386-392, 2018.

MIMURA, Aparecida M. S.; OLIVEIRA, Marcone A. L.; CIMINELLI, Virgínia S. T.; SILVA, Júlio C. J. Optimization of ultrasound-assisted extraction of Cr, Cu, Zn from sediment, followed by FAAS and GFAAS analysis. **Journal of AOAC International**, v. 99, n. 1, 2016.

NAWAR, Sawsan; EISSA, Fawzy. Rapid, accurate and non-destructive multi-elemental analysis of soil samples by portable X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). **Environmental Monitoring and Assessment**,v.192,2020.https://doi.org/10.1007/s10661-020-8136-2

NIAZI, Nabeel K.; CHAUDHRY, Muhammad T.; AKHTAR, Muhammad S.; et al. Mechanistic insights on the efficiency of biochar-based metal chelation: Spectroscopic evidence. **Science of the Total Environment**, v. 724, p. 138173, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138173

OLIVEIRA, A. S. et al. Microrganismos no sedimento de margens opostas do estuário do rio Coreaú em Camocim/CE. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 18, n. 1, p. 216–228, 2021.

OLIVEIRA, J. P. et al. Heavy metal contamination in river sediments: Industrial discharges and agricultural practices impact. **Journal of Environmental Geochemistry**, v. 25, n. 3, p. 198-212, 2021.

PEPLINSKA, B. et al. Distribution and bioavailability of heavy metals in bottom sediments: The role of organic matter and grain size. **Science of the Total Environment**, v. 712, 2020.

PEPLINSKA, B. et al. Distribution and bioavailability of heavy metals in bottom sediments: The role of organic matter and grain size. **Science of the Total Environment**, v. 712, 2020.DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136376

PROTANO, Giuseppe; NANNONI, Francesco. Influence of ore processing activity on the contamination and speciation of Hg, As and Sb in soils in a former mining area (Monte Amiata district, Italy). **Chemosphere**, v. 199, p. 320–330, 2018.

RAFIQUE, Uzma; NAZIR, Rabia; IQBAL, Mehwish; et al. Challenges and advancements in sustainable remediation of heavy metal-contaminated soils using chelating agents: A review. **Environmental Research**, v. 206, p. 112578, 2022.

SANTOS, E. R.; RIBEIRO, C. F.; LOPES, G. A. Environmental remediation in the Salgado River: Sediment composition and adsorption of heavy metals. **Applied Geochemistry**, v. 47, p. 402-411, 2022.

SATHYANARAYANAN, M. et al. Seasonal Geochemical Analysis of toxic metal contamination and ecological risks: relevance of heavy metals, TOC and pH in sediments. **Journal of Environmental Quality**, 2024.

SATHYANARAYANAN, M. et al. Seasonal geochemical analysis of toxic metal contamination and ecological risks: relevance of heavy metals, TOC and pH in sediments. **Journal of Environmental Quality**, 2024.DOI: https://doi.org/10.1002/jeq2.20438

SENN, D. B.; BANK, M. S. Environmental geochemistry of trace metals: linking biogeochemistry and ecotoxicology. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 31, n. 9, p. 1951–1956, 2012.

SHARMA, Sunita; RANA, Seema; SHARMA, Ramesh K. Chelation therapy and its applications in the removal of toxic metals from soil and plants: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 401, p. 123382, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123382

SILVA NETO, I. F.; SOUZA, M. N. C.; ALMEIDA, S. C. X. Degradação de corantes por processos fotocatalíticos no tratamento de efluentes industriais: uma revisão integrativa. BIOFARM - **Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management**, v. 16, n. 4, p. 365–373, 2023. Disponível em: https://revista.uepb.edu.br/BIOFARM/article/view/2220.

SILVA, A. B. et al. Aplicação de compostos para redução de metais pesados no solo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2024, São Paulo. Anais eletrônicos... São Paulo: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2024.

SILVA, A. L.; COSTA, R. P.; MELO, T. C. Geochemical analysis of sediments in the Salgado River basin: Sources and environmental implications. **Journal of Geochemistry and Environment**, v. 35, n. 3, p. 128-136, 2021.

SILVA, F. C. et al. Chemical analysis of soils, plants, and fertilizers. 2nd ed. Brasília: **EMBRAPA** Informação Tecnológica, 2019.

SRADHANJALI BASTI; SAHU, C.; PATI, S.; SAHU, S. K. Sediment organic carbon influence heavy metal speciation in Hirakud reservoir: case of a Ramsar site in India. **International Journal of Environmental Science and Technology,** mar. 2025.

TCHOUNWOU, Paul B. et al. **Heavy metal toxicity and the environment.** EXS, v. 101, p. 133-164, 2012. DOI: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6.

WEI, X.; WEI, Z.; FENG, J.; GUO, Y. Sources and risk assessment of heavy metals in soil from a typical industrialized city in central China**. Science of the Total Environment,** v. 737, 139532, 2020.

YANG, J.; LIU, W.; ZHANG, Z.; ZHANG, J. Remediation of heavy metal contaminated soils by enhanced washing with biodegradable chelating agents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 378, 120741, 2019.

ZHANG, C. et al. Speciation and risk assessment of heavy metals in sediments of small urban rivers in China. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 16, p. 2360–2369, 2014.

ZHANG, L. *et al.,* Photocatalytic remediation of heavy metals: The role of modified TiO_2. **Chemical Engineering Journal**, v. 384, p. 123–136, 2020.

ZHANG, W.; LI, Y.; CHEN, J. Photocatalytic remediation of heavy metals in industrial wastewater using TiO_2 doped with organic chromophores. **Water Research**, v. 234, p. 118-126, 2023.

ZHAO, J.; ZHANG, H.; WANG, S. Advanced methods for detecting heavy metal contamination in soils and their potential applications in phytoremediation research. **Environmental Science and Technology**, v. 56, n. 10, p. 5872-5883, 2022.

ZHAO, Yaping; LI, Wei; TIAN, Rui; et al. Determination of trace elements in soils using ICP-MS after ultrasound-assisted digestion: Optimization and application. **Microchemical Journal**, v. 162, p. 105837, 2022.

ZHOU, Y.; XU, Y.; SUN, J.; ZHAO, S. Sustainable approaches for the remediation of heavy metal-polluted soils: A review of current research and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, 122138, 2020.

CETESB. Valores da condição da qualidade dos solos da bacia hidrográfica do Alto Tietê - UGRHI 6 e região metropolitana de São Paulo - RMSP. São Paulo: CETESB, 2008. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 01034103).