



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DIEGO FABRICIO SANTA ROSA CARDOSO**

**ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E DETERMINAÇÃO DE  
BASELINES GEOQUÍMICOS NO SOLO DE BARCARENA, PARÁ.**

**BELÉM**  
**2025**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DIEGO FABRICIO SANTA ROSA CARDOSO**

**ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E DETERMINAÇÃO DE  
BASELINES GEOQUÍMICOS NO SOLO DE BARCARENA, PARÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Sergio Bastos de Matos

**BELÉM**  
**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C268e Cardoso, Diego Fabricio Santa Rosa  
ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E DETERMINAÇÃO DE BASELINES  
GEOQUÍMICOS NO SOLO DE BARCARENA, PARÁ / Diego Fabricio Santa Rosa Cardoso. - 2025.  
60 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia(PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Sergio Bastos de Matos

1. Avaliação de contaminantes ambientais; antropização do solo; mineração do estado do Pará. I. Matos , Gilson Sergio Bastos de, *orient.* II. Título

---

CDD 631.422

**DIEGO FABRICIO SANTA ROSA CARDOSO**  
**ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E DETERMINAÇÃO DE**  
**BASELINES GEOQUÍMICOS NO SOLO DE BARCARENA, PARÁ.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, visando a obtenção do título de mestre.

**Aprovado em 28 fevereiro de 2025**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Gilson Sergio Bastos de Matos**  
**Orientador**  
**Universidade Federal Rural da Amazônia**

---

**Prof. Dr.<sup>a</sup>**  
**1º Suzana Romeiro Araújo**

---

**Prof. Dr.**  
**2º Leandro Machado de Carvalho**

---

**Dr.**  
**3º Deyvison Andrey Medrado Gonçalves**

Aos meus pais Oswaldo e Claudinéia Cardoso, que sempre estenderam as mãos para espantar qualquer tristeza. Aos meus irmãos, que foram as velas que iluminaram o meu caminho. Aos meus sogros Claudete e Fabrício Marim, que nunca deixaram o meu cálice secar. E a minha esposa Fabíola Cardoso, que com sua aliança eu pude conquistar tudo.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser tudo, por estar comigo em tudo, toda honra e glória ao seu nome.

À minha esposa, por todos esses anos de parceria, por toda paciência que sempre me deu ao longo dessa minha jornada, pelas noites acordada comigo enquanto desenvolvia essa pesquisa e por ser o meu amor.

À meus pais e família, sou imensamente grato por tudo que vocês fizeram por mim, o homem que eu sou hoje é reflexo de tudo que vocês me ensinaram.

À meus sogros, por sempre acreditarem no meu potencial e me incentivarem todos os dias.

À Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pelo ensino, crescimento profissional e pela estrutura que foram de grande auxílio durante o mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

Ao meu orientador Gilson Sergio Bastos de Matos, pela orientação dedicada, pela confiança, paciência e incentivo contínuo durante a realização desta pesquisa. Ao professor Marcos André Piedade Gama, por ser um exemplo de profissional e um conselheiro.

Ao grupo Prosolum, pelo compartilhamento de conhecimentos, pelas discussões enriquecedoras e pelo suporte ao longo do mestrado. Aos amigos do laboratório de fertilidade, todos esses anos durante graduação e pós-graduação foram muito importantes para mim.

Aos meus amigos da pós-graduação Bruna, Adrielly, Willker e Felipe, vocês foram a melhor companhia que eu poderia ter nesse período e tornaram os meus dias na universidade mais leves e criativos, o tempo voa quando a gente se diverte.

À banca, pelas grandes contribuições para melhoria dessa pesquisa.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Região do delta do rio Amazonas, nordeste do estado do Pará, onde se situa o município de Barcarena, estado do Pará. ....	14
Figura 02: Mapa demonstrativo de empresas e portos instalados no município de Barcarena, estado do Pará. ....	15
Figura 03: Identificação dos Elementos Potencialmente Tóxicos na Tabela Periódica. ....	17
Figura 04: Diferenças na Origem e Uso de Dados entre Valores de Fundo (Background) e Linhas de Base Geoquímicas. ....	22
Figura 05: Mapa de localização e malha amostras da área de estudo no município de Barcarena, Pará. ....	34
Figura 06: Classificação climática segundo Koeppen e Classificação de solos segundo Embrapa 2003, referentes a área de estudo em Barcarena Pará. ....	35
Figura 07: Materiais de origem geológicas encontrados no município de Barcarena, Pará. ....	36
Figura 08: Boxplots dos EPTs mostrando a distribuição dos elementos químicos nos solos superficiais e profundos. ....	44
Figura 09: Análises de Componentes Principais avaliando o comportamento dos EPTs estudados em amostras de solo do município de Barcarena, Pará. ....	46
Figura 10: Mapa de anamorfose pontual classificado segundo as faixas da resolução Conama 420/2009, para os teores dos elementos avaliados em amostras de solo de Barcarena, Pará. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Teores de Atributos Químicos e Físicos do Solo de Duas Profundidades em Barcarena, Pará. ....	41
Tabela 2: Estatística descritiva dos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) em Amostras de Solo de Duas Profundidades no Município de Barcarena. ....	43
Tabela 3: Relação de amostras acima dos valores de prevenção e intervenção previstos na resolução do Conama 420/2009. ....	48
Tabela 4: Tabela descritiva dos percentuais de amostras abaixo do limite de detecção para os elementos avaliados nos solos de Barcarena, Pará. ....	50
Tabela 05: Valores de Baseline geoquímicos obtidos por diferentes métodos estatísticos para solos de duas profundidades de Barcarena, Pará. ....	52
Tabela 06. Comparação entre valores de BG e BL propostos pela literatura científica nacional e internacional. ....	54

## SUMÁRIO

CONTEXTUALIZAÇÃO .....	12
REVISÃO DA LITERATURA.....	13
Indústria e Meio Ambiente: O Caso de Barcarena em Perspectiva.....	13
Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) .....	16
Legislação e Diretrizes Ambientais .....	19
Baselines geoquímicas (BL).....	21
REFERÊNCIAS .....	23
ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E DETERMINAÇÃO DE BASELINES GEOQUÍMICOS NO SOLO DE BARCARENA, PARÁ.....	32
INTRODUÇÃO.....	32
MATERIAL E MÉTODOS .....	33
Área de estudo .....	33
Amostragem de solo .....	36
Análises físico-químicas e de EPT's .....	37
Análise de dados.....	38
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
Comportamento de atributos químicos e físicos do solo.....	40
Avaliação de amotras quanto a Resolução 420 do Conama .....	46
Baselines Geoquímicas para o Município de Barcarena .....	50
CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS .....	56

## RESUMO

O município de Barcarena, no estado do Pará, abriga um relevante polo industrial, incluindo atividades minero-metalúrgicas, e tem sido alvo de debates sobre impactos ambientais. A contaminação do solo por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) é uma preocupação central, especialmente devido à falta de informações sistemáticas que possam subsidiar ações do poder público. Este estudo teve como objetivo avaliar as concentrações de arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), Chumbo (Pb), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), mercúrio (Hg), molibdênio (Mo), níquel (Ni), zinco (Zn), alumínio (Al) e ferro (Fe) nos solos do município e determinar valores de baseline geoquímicos para esses elementos. Foram coletadas amostras em duas profundidades (0-20 cm e 40-60 cm), e as concentrações foram comparadas aos valores estabelecidos pela Resolução 420/2009 do Conama. As análises foram realizadas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), exceto para Hg, determinado por espectrometria de fluorescência atômica de vapor a frio. Os resultados demonstraram que 8 amostras ultrapassaram os Valores de Prevenção (VP) para Ba, 12 para Cu, 6 para Cr e 27 para Hg, enquanto 2 amostras excederam o limite para Cd e Ni. Além disso, os Valores de Investigação para Áreas Agrícolas (VIAgri) foram ultrapassados em 2 amostras para Cd e Cr, 1 para Cu e 10 para Hg, reforçando a necessidade de atenção a esses elementos. Para áreas residenciais (VIRes), apenas 1 amostra ultrapassou o limite para Cr, e nenhuma amostra excedeu os critérios estabelecidos para áreas industriais (VIIInd). O teste de Mann-Whitney U revelou diferença estatística significativa entre as profundidades para As, Ba, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Zn, Al e Fe, sendo que, para todos os elementos, exceto Cd e Co, as concentrações foram maiores na camada de 40-60 cm. Os valores de baseline variaram conforme os métodos utilizados, sendo TIF e MAD os mais tolerantes, enquanto  $I2\sigma$  foi o mais rigoroso. Além disso, os valores de baseline foram maiores para as amostras da camada mais profunda, refletindo a influência da geologia local e possíveis processos de mobilização de metais ao longo do perfil do solo. Esses achados indicam que a contaminação pode estar associada tanto a fontes antrópicas quanto a processos naturais de enriquecimento geoquímico. Dessa forma, espera-se que este estudo contribua para a compreensão da qualidade química dos solos e forneça subsídios para estratégias de gestão ambiental mais eficazes, promovendo ações que minimizem os impactos da contaminação e garantam a proteção das funções ecológicas do solo.

Palavras-chave: avaliação de contaminantes ambientais; antropização do solo; Conama 420/2009; mineração no estado do Pará.

## ABSTRACT

The municipality of Barcarena, in the state of Pará, is home to a major industrial center, including mining and metallurgical activities, and has been the subject of debates about environmental impacts. Soil contamination by potentially toxic elements (PTEs) is a major concern, especially due to the lack of systematic information that can support public authorities' actions. The aim of this study was to assess the concentrations of arsenic (As), barium (Ba), cadmium (Cd), lead (Pb), cobalt (Co), copper (Cu), chromium (Cr), mercury (Hg), molybdenum (Mo), nickel (Ni), zinc (Zn), aluminum (Al) and iron (Fe) in the municipality's soils and to determine geochemical baseline values for these elements. Samples were collected at two depths (0-20 cm and 40-60 cm), and the concentrations were compared to the values established by Conama Resolution 420/2009. The analyses were carried out using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), except for Hg, which was determined using cold vapor atomic fluorescence spectrometry. The results showed that 8 samples exceeded the Prevention Values (PV) for Ba, 12 for Cu, 6 for Cr and 27 for Hg, while 2 samples exceeded the limit for Cd and Ni. In addition, the Investigation Values for Agricultural Areas (VIAGri) were exceeded in 2 samples for Cd and Cr, 1 for Cu and 10 for Hg, reinforcing the need to pay attention to these elements. For residential areas (VIRes), only 1 sample exceeded the limit for Cr, and no sample exceeded the criteria established for industrial areas (VIInd). The Mann-Whitney U test revealed statistically significant differences between the depths for As, Ba, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Zn, Al and Fe, and for all elements except Cd and Co, concentrations were higher in the 40-60 cm layer. Baseline values varied according to the methods used, with TIF and MAD being the most tolerant, while  $I2\sigma$  was the strictest. In addition, baseline values were higher for samples from the deepest layer, reflecting the influence of local geology and possible metal mobilization processes along the soil profile. These findings indicate that contamination can be associated with both anthropogenic sources and natural geochemical enrichment processes. In this way, it is hoped that this study will contribute to understanding the chemical quality of soils and provide subsidies for more effective environmental management strategies, promoting actions that minimize the impacts of contamination and guarantee the protection of the soil's ecological functions.

Keywords: evaluation of environmental contaminants; soil anthropization; Conama 420/2009; mining in the state of Pará.

## CONTEXTUALIZAÇÃO

O solo é um componente importante do ambiente ecológico natural, é de grande valor na manutenção da produtividade das plantas e no suporte à sobrevivência humana (Hu et al., 2013; Li et al., 2021). Logo, a detecção e visualização da contaminação por elementos poluentes são de suma importância para a proteção das funções ecológicas do solo e para a agricultura (Wuana e Okieimen, 2011; Galán et al., 2019).

Nos últimos anos, de forma global, a expansão das atividades industriais e humanas em geral, resultaram drasticamente em várias formas de poluição dos solos (Zulkernain, Uvarajan e Chuan Ng, 2023). E a principal preocupação, é a incorporação de elementos potencialmente tóxicos (EPT) nos solos e a possibilidade de mobilidade desses elementos para outros ecossistemas, como águas subterrâneas, rios, atmosfera e plantações (Díaz Alarcón et al., 2024).

A contaminação do solo por EPTs em áreas urbanas é, atualmente, um problema ambiental de grande relevância tanto para países desenvolvidos, quanto para os em desenvolvimento (Islan, Ahmed e Al-Mamun, 2015; Chakraborty et al., 2023). Relacionado a isso, a principal preocupação da incorporação de EPT nos solos é a possibilidade de mobilidade para outras matrizes, como águas subterrâneas, rios, atmosfera e plantações (Díaz Alarcón et al., 2024).

Nesse contexto, o município de Barcarena é um importante polo minério-industrial do estado do Pará, sendo desde 2021 o sexto maior PIB do estado (IBGE 2021). Entretanto, tem sido historicamente impactada por desastres tecnológicos e ambientais. Tais problemas, geram debates quanto ao direito ambiental e ao papel dos governos da proteção desses direitos (Gomes, Rodrigues e Ferreira, 2020), bem como quanto ao grau de vulnerabilidade ambiental do município (Cunha, 2018).

Sendo assim, a necessidade de pesquisas que avaliem possíveis impactos de poluentes gerados pelas atividades desenvolvidas se torna evidente. Segundo De Matos et al. (2023), pesquisas que abordem o tema de poluição dos solos de Barcarena com EPT ainda são incipientes.

Portanto, os objetivos desse estudo são determinar as concentrações de EPTs, avaliar possíveis focos de contaminação, bem como propor valores de orientação, conhecidos como Baseline Geoquímicos. A partir da hipótese de que as concentrações de EPTs estão sendo elevadas pelas atividades antrópicas em Barcarena. Os resultados desse estudo poderão

contribuir com a qualidade ambiental e a proteção da saúde pública, bem como, com informações técnicas para construção de políticas públicas de proteção ambiental no município.

## **REVISÃO DA LITERATURA**

### **Indústria e Meio Ambiente: O Caso de Barcarena em Perspectiva**

A partir da década de 1970, políticas governamentais de desenvolvimento, deram início a uma série de transformações na Amazônia, em setores como transporte, energia, economia e organização urbana (Castro, 1995; Carmo e Costa, 2016). Essas transformações ocorreram principalmente para dar suporte aos complexos industriais que foram sendo instalados na região (Coelho, Monteiro e Santos, 2009; Nascimento e Hazeu, 2015).

Durante esse período, o município de Barcarena passou a se tornar sede de dois dos maiores complexos industriais da Amazônia. Primeiramente instalou-se no município o Complexo Industrial da Alunorte, pertencente ao grupo Norsk Hydro ASA, empresa norueguesa, com destaque na mineração de bauxita e produção de alumina e alumínio (Da Silva, 2012; Lemos e Pimentel, 2021). Em seguida ocorreu a instalação do complexo industrial de beneficiamento do caulim, gerenciado pelas empresas Imerys Rio Capim Caulim (IRCC) e Pará Pigmentos (PPSA) (Lemos e Pimentel, 2021; Pontes, 2023). Tornando-se assim, um importante exportador de commodities minerais.

Esse interesse pelo município se deu principalmente pela sua localização estratégica para escoamento de produtos. Pois, o município está localizado na região do Delta do rio Amazonas (Figura 01), o que abrange a Baía do Guajará, que fica em frente à cidade de Belém, na confluência dos rios Guamá, Moju, Acará e Capim (Carmo e Costa, 2016).

Figura 01. Região do delta do rio Amazonas, nordeste do estado do Pará, onde se situa o município de Barcarena, estado do Pará.



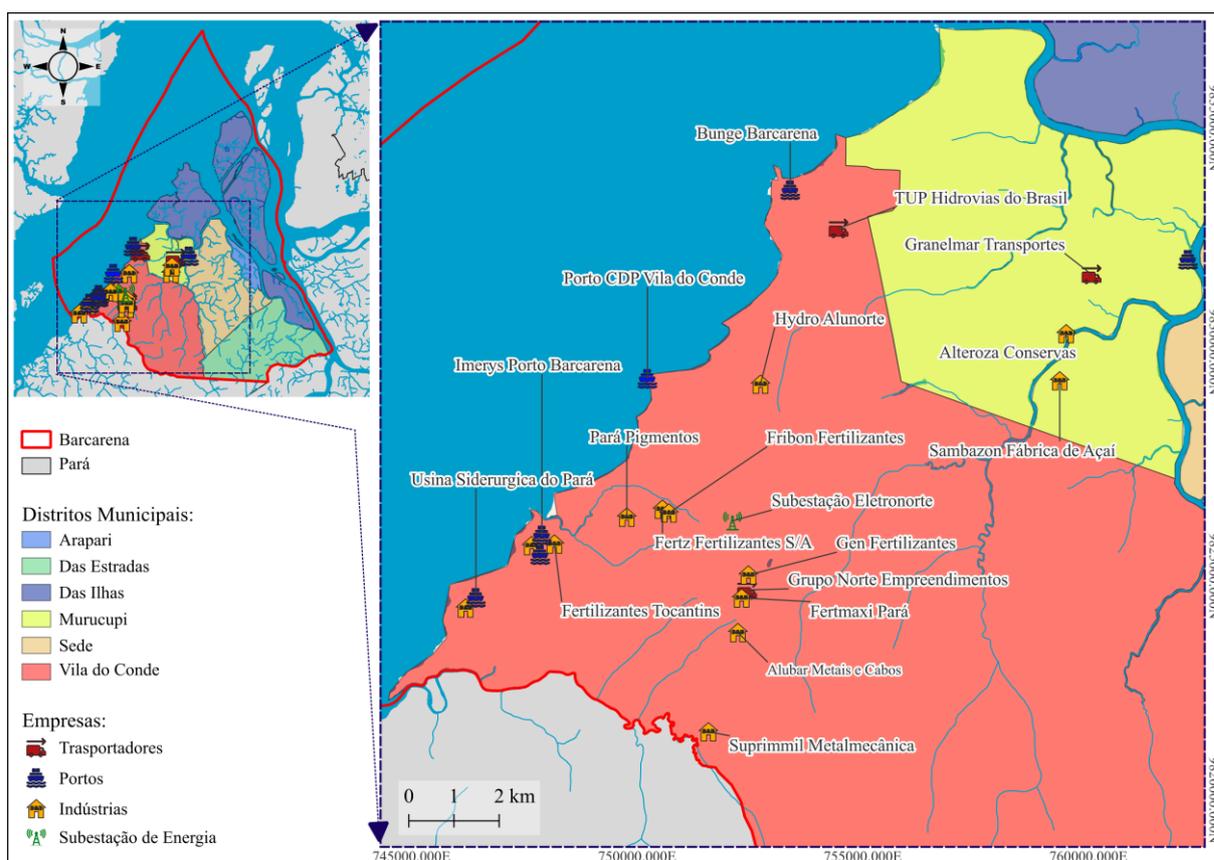
Fonte: Autor, 2024.

Em conjunto com as instalações desses complexos industriais no município, o governo federal custeou toda uma infraestrutura para dar suporte a essas empresas, como a construção de uma usina hidrelétrica, vias de transporte viário e hidroviários, bairro residências como a Vila dos Cabanos, bem como uma malha portuária, sendo um desses portos na Vila do Conde, gerenciado pela estatal Companhia Docas do Pará (CDP) e outros dois portos de gerência privada (Nahum, 2008; Coelho, Monteiro e Santos, 2009).

Neste contexto, ao passo que Barcarena recebeu toda essa estrutura, outras empresas de diferentes ramos comerciais também se instalaram no município, nota-se no mapa da cidade (figura 02) empresas como a Usina Siderurgica do Pará (USIPAR), produtora de ferro-gusa, matéria-prima para a produção de aço (Hazeu e Costa, 2022). Outros exemplos são a Fertilizantes Tocantins (Eurochen), GEN Fertilizantes e Fertz Fertilizantes, multinacionais produtoras de fertilizantes. Entre todas essas indústrias, o município ainda se tornou um importante player quanto a exportação de grãos no estado (Daminato e Benitez, 2015; Geraldine e Silva, 2016).

Entretanto, mesmo com todo esse crescimento econômico e industrial o município ainda enfrenta alguns dilemas ambientais e sociais. Segundo o último censo do IBGE ocorrido em 2022, apenas 30,18% dos domicílios ocupados permanentemente possuem água encanada ligada a rede geral do município. Ainda segundo o mesmo censo, 53,44% dos domicílios descartam o seu esgoto em valas, fossas rudimentares ou diretamente em rios e lagos.

Figura 02: Mapa demonstrativo de empresas e portos instalados no município de Barcarena, estado do Pará.



Fonte: Autor, 2024.

Da mesma forma, quanto ao descarte de resíduos sólidos, segundo De Matos et al. (2023), no município existe um lixão a céu aberto, potencial poluente de águas subterrâneas e corpos hídricos superficiais, portanto, a área apresenta diversas fontes potenciais de contaminação e riscos para a saúde humana.

Ademais, o município tem ainda um histórico de ocorrência de algumas fatalidades ambientais, a exemplo, do naufrágio do navio Haidar ocorrido no ano de 2015, o qual transportava cerca de 4.800 animais e mais de 700 toneladas de combustíveis (Dos Santos e Nascentes, 2019; Pereira e Magalhães, 2023). Portanto, foram ocorrências que influenciaram toda a dinâmica socioambiental da população de Barcarena.

Nesse contexto, várias pesquisas foram desenvolvidas no município, a fim de alertar sobre desequilíbrios ambientais causados por essas atividades no município, algumas dessas como:

- Cunha (2018) e Rodrigues et al. (2020), abordaram sobre vulnerabilidade ambiental como variável, considerando dados da geomorfologia, pedologia, geologia, climatologia e uso da terra.
- Matos et al. (2020), realizaram um estudo socioambiental relacionado ao processo produtivo da Bauxita em Barcarena.
- Gomes, Rodrigues e Ferreira (1987), abordaram sobre o papel do direito internacional na prevenção de desastres ambientais e na construção de modelos de proteção ambiental no município.
- De Matos et al. (2023), discorreram sobre a presença de EPTs nos solos de Barcarena, destacando a poluição causada na área do lixão municipal.
- Enquanto, Coelho et al. (2017), envolvem Barcarena na discussão sobre os papéis dos governos e grandes empresas na construção de polos industriais e na ocorrência de grandes desastres ambientais.

### **Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)**

Contaminantes ambientais são substâncias ou elementos que estão presentes no ambiente natural em níveis superiores aos seus limites permitidos (Rahman e Singh, 2019; Singh et al, 2023). Porém, ao contrário da maioria das substâncias orgânicas que podem ser metabolizadas pela microbiota natural, esses elementos contaminantes são indestrutíveis e, persistem no meio ambiente por um longo tempo (Rahman e Singh, 2018).

A principal preocupação da incorporação de elementos potencialmente perigosos em solos, é a possibilidade de mobilidade para outros ecossistemas, como águas subterrâneas, rios, atmosfera e plantações (Díaz Alarcón et al., 2024). O alto teor desses elementos não apenas influencia negativamente a estrutura e a função ecológica do solo, mas também causam graves danos à saúde humana por meio de múltiplas vias de exposição, como transmissão da cadeia alimentar, contato dérmico e inalação (Zeng et al, 2018; Li et al., 2021).

Anteriormente, esses elementos eram conhecidos como metais pesados, pois são caracterizados por seu maior peso atômico ou maior densidade (Singh et al, 2023). Entretanto, o termo entrou em desuso pois, alguns metais pesados não são tóxicos, a exemplo do ouro (Au)

(Tchounwou et al., 2012; Singh et al, 2023), enquanto outros em baixas concentrações podem até ser benéficos a organismos como as plantas (Thalassinos et al., 2023). Logo, sendo um termo controverso na literatura, pois não há uma definição padronizada, o uso do termo “elementos potencialmente tóxicos” é mais recomendado (Pourret e Hursthouse 2019; Pourret et al. 2020; Carvalho, Boreto e Oliveira, 2022).

Portanto, os elementos potencialmente tóxicos (EPT) são um grupo específico, o qual inclui elementos sem nenhuma função biológica e tóxicos em qualquer concentração como o mercúrio (Hg), cádmio (Cd), crômio (Cr)(VI), arsênio (As) e chumbo (Pb), bem como elementos que podem possuir funções biológicas, mas são prejudiciais em altas concentrações como o ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), alumínio (Al), cobalto (Co) e molibdênio (Mo), (Caporale e Violante, 2016; Rahman e Singh, 2018; Thalassinos et al., 2023). A figura 03 apresenta os elementos considerados potencialmente tóxicos, classificados em metais, metalóides e não metais.

Figura 03: Identificação dos Elementos Potencialmente Tóxicos na Tabela Periódica.

H	Metais										Metalóides		Não metais				He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			A	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Fonte: Adaptado de Caporale e Violante, 2016.

Níveis elevados de EPT's nos solos são geralmente resultantes de ações antrópicas e geram preocupação devido ao seu potencial de toxicidade. Os solos no geral, são propensos à contaminação por diversas fontes como a atmosférica, hidrológica, o descarte direto de resíduos sólidos, a aplicação de fertilizantes, esterco animal, pesticidas e bio-sólidos, além de diversos

processos industriais como a queima de combustíveis fósseis (Navas e Machin, 2002; Silveira, Alleoni e Chang, 2008; Singh, 2016; Nugraha et al., 2022).

Entretanto, os EPT's estão amplamente distribuídos na natureza e, na ausência de intervenções antrópicas, suas concentrações dependem exclusivamente de processos naturais pedogenéticos, do material de origem e do grau de desenvolvimento do solo (Ali, Ishiga e Wakatsuki, 2003; Silva et al., 2016; Costa et al., 2017).

Esses elementos podem estar presentes como componentes de minerais primários em fragmentos de rochas, como íons substitutos em redes cristalinas de minerais secundários, como quelatos ou adsorvidos nas superfícies dos coloides, entre outras formas (Schmitt e Sticher, 1991; McBride, 1994; Zinn et al., 2020). Assim, a principal fonte natural de EPT's provém da degradação geológica desse material (Nugraha et al., 2022).

Por exemplo, EPT's são mais concentrados em xistos e argilas, e menos presentes em areias e calcários (Martin et al., 2006; Antoniadis e Golia, 2021). Sendo assim, os processos pedogenéticos como o intemperismo, a lixiviação e a erosão atuando sobre esses materiais resultariam na liberação desses elementos em teores bem diferentes.

Ressalta-se ainda, o tipo de solo e seu grau de desenvolvimento, aspectos que influenciam a sua capacidade de sorção de metais na forma de cátions e ânions, dependendo da intensidade do intemperismo (Caporale e Violante, 2016). Segundo Antoniadis e Golia (2021), estudos anteriores já demonstram que parâmetros como o teor de matéria orgânica, a presença de argilas do tipo 2:1, elevados teores de  $\text{CaCO}_3$  e óxidos de Fe e Al, reduzem a biodisponibilidade de metais para absorção pelas plantas. Isto ocorre pois, no solo, os metais pesados podem ser adsorvidos eletrostaticamente nos sítios de troca (não específica), ligados à fase inorgânica por ligações covalentes (específica), participar de reações de precipitação e dissolução, ou estar associados a compostos orgânicos e na solução do solo (McBride, 1994; Araújo e Sobrinho, 2000). Assim, a composição mineralógica e a evolução do solo são cruciais para a retenção de elementos potencialmente tóxicos.

A recuperação de áreas poluídas por EPT's é possível, porém a eficácia desses métodos dependerá de fatores como o tipo de solo, a natureza dos contaminantes e o uso final desejado do solo remediado (Prya et al., 2023). Algumas pesquisas relatam a utilização de plantas como fitorremediadoras (Souza et al., 2011; Prya et al., 2023), cita-se também a utilização de microrganismos como absorventes de EPT's tanto por absorção (bioacumulação), quanto por adsorção (Dixit et al., 2015), existem ainda algumas pesquisas que avaliam a ação de condicionadores do solo como  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  e hidroxiapatita sintética (HA), na

imobilização desses elementos, entre outros processos físicos e químicos (Silveira, Alleoni e Chang, 2008; Murtaza et al., 2014).

## **Legislação e Diretrizes Ambientais**

Para controlar os efeitos das atividades humanas no meio ambiente, muitos países ao redor do mundo, em diferentes momentos, introduziram ferramentas legislativas para salvaguardar a saúde pública (Aruta et al., 2023).

Em âmbito internacional, a Agência de Registro de Substâncias Tóxicas e Doenças (ATSDR), controlada pelo Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos EUA, realiza avaliações sistemáticas sobre a toxicidade de diversos contaminantes. Em 2022, a ATSDR publicou uma lista de prioridade de elementos perigosos, classificados com base em uma combinação de sua frequência, toxicidade e potencial de exposição humana. Essa lista conta com 275 substâncias, aos quais apenas molibdênio (Mo) e ferro (Fe) não estão presentes, entretanto arsênio (As), mercúrio (Hg) e cádmio (Cd) ocupam as posições de 1º, 3º e 7º colocados quanto ao nível de prioridade (ATSDR, 2022).

No Brasil, destacam-se algumas leis e resoluções que norteiam as avaliações de EPT's, além de indicarem métodos de gerenciamento de áreas potencialmente contaminadas, juntas, essas normativas promovem uma abordagem integrada para a gestão de resíduos e a prevenção da contaminação ambiental, são elas:

A Portaria nº 85 do IBAMA, de 17 de outubro de 1996 (BRASIL, 1996), estabelece normas para o controle da poluição por metais pesados em efluentes e corpos d'água, visando proteger a qualidade dos recursos hídricos e a saúde pública.

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), estabelecendo diretrizes para a gestão adequada dos resíduos, promovendo a redução, reutilização e reciclagem, além de responsabilizar os geradores pelo manejo dos resíduos. Em complemento, a NBR 10004 da ABNT, publicada em 2004, classifica os resíduos sólidos em diferentes categorias, orientando sua gestão e tratamento (ABNT, 2004).

A Instrução Normativa nº 6, de 2014 (BRASIL, 2014), estabelece os procedimentos para a elaboração e entrega do Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (RAPP), que visa monitorar e controlar as atividades que possam causar impacto ambiental. O relatório deve ser apresentado anualmente pelos empreendimentos que desenvolvem atividades com potencial poluidor, conforme previsto na

Lei nº 6.938/1981 (BRASIL, 1981), que trata da Política Nacional de Meio Ambiente. O RAPP inclui informações sobre emissões, geração de resíduos e o uso de recursos naturais.

A resolução 420 de 28 de dezembro de 2009, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2009), alterada, no ano de 2013, por meio da Resolução CONAMA nº 460 (BRASIL, 2013), estabelece critérios e valores orientadores para a qualidade do solo no Brasil, com foco na presença de substâncias químicas, especialmente os elementos potencialmente tóxicos (EPT). Essa resolução é crucial para a gestão ambiental, pois define valores de prevenção e investigação que orientam o monitoramento de contaminantes no solo. Os valores estabelecidos são fundamentais para a identificação de áreas contaminadas e para a implementação de ações de remediação.

Essa resolução foi o ponto de partida para que algumas pesquisas passassem a propor valores de referência para alguns estados Brasileiros, alguns destes como:

- Preston et al. (2014), “Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do Rio Grande do Norte”;
- Rebêlo et al. (2020), “Valores de referência da concentração de metais pesados em solos na Amazônia central”, trabalho realizado no estado do Amazonas;
- Paye et al. (2010), “Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo”;
- Santos (2011), dissertação de mestrado, “Valores de referência de metais pesados em solos de Mato Grosso e Rondônia”;
- Moreira (2014), tese de doutorado, “Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos de mangue do Estado do Ceará: subsídios para gestão da zona costeira”;
- Rodrigues H. (2020), dissertação de mestrado, “Mapeamento digital e valores de referência de qualidade de metais pesados em solos das regiões do Norte e Noroeste, Rio de Janeiro (RJ)”;
- Mattos (2014), dissertação de mestrado, “Valores de referência de qualidade e adsorção de metais pesados em solos da Região do Médio Paraíba – RJ”;
- Moura (2018), tese de doutorado, “Valores de Referência de Qualidade (VRQs) de metais pesados para os principais tipos de solos de Alagoas”.

Alguns desses trabalhos, entre outros, serviram como base para o estabelecimento de normas, que definiram valores de referência de qualidade oficiais e que se tornaram lei em seus

estados. Atualmente os estados de Minas Gerais (COPAM, 2011), São Paulo (CETESB, 2014), Paraíba (COPAM, 2014), Rio Grande do Sul (FEPAM, 2014), Pernambuco (CPRH, 2014), Alagoas (CEPRAM, 2020) e Santa Catarina (IMA, 2021) já possuem normativas que indicam os valores de referência de qualidade do solo para suas regiões.

No estado do Pará encontra-se um trabalho proposto por Fernandes et al. (2018), intitulado “Valores de referência de qualidade e concentrações de fundo de elementos potencialmente tóxicos em solos da Amazônia Oriental, Brasil.” Entretanto, não há normativas ou resoluções oficiais no estado quanto a VRQs.

### **Baselines geoquímicas (BL)**

Ao passo que a contaminação dos solos por elementos tóxicos se tornou cada vez maior, a necessidade de definir parâmetros de avaliação ambiental também cresceu.

A avaliação de Backgrounds (BG) ou valores de fundo geoquímicos, surgiu como uma das metodologias criadas para investigar as concentrações de elementos tóxicos no solo. Os BG representam teores de EPT's no solo que não são resultantes da influência de atividade humanos, eles estão relacionados ao material de origem e aos processos de formação do solo, que determinam a quantidade e a distribuição de PTE's no perfil do solo (Galán et al., 2008; Guan et al., 2019; Gonçalves et al., 2022).

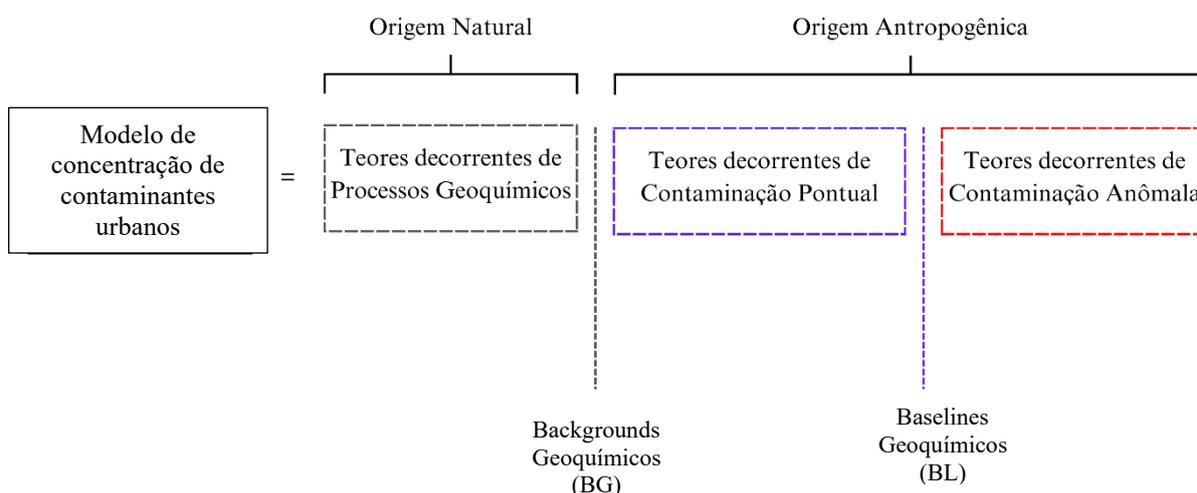
Entretanto, devido a intensa antropização de solos, decorrente da pressão exercida pela expansão urbana, agrícola e industrial, muitas vezes é difícil quantificar as concentrações naturais de fundo de EPT's em solos (Zhao et al., 2007; Zhang et al., 2023). Para Selvaggi et al. (2020), nenhum fundo natural puro e local está facilmente disponível para metais nos sedimentos. Alguns autores argumentam não mais existir valores de fundo naturais no planeta e, particularmente em regiões industrializadas há muito tempo (Reimann e Garrett, 2005; Zhao et al., 2007).

Portanto, como os BG são difíceis de determinar em áreas urbanas, nesses casos a metodologia de Baselines (BL) ou linhas de base geoquímicas em uma tradução literal, se demonstrou uma avaliação mais útil. Enquanto o BG reflete a concentração de elementos em seu estado natural, sem interferência humana, a BL é uma referência para ambientes já modificados (Sappa, Barbieri e Andrei, 2020; Belbèze et al., 2023).

Algumas pesquisas definem ainda os baselines como o limite entre o fundo e a anomalia, ou seja, a parte abaixo da linha de base é considerada o fundo geoquímico, e a parte acima da linha de base é considerada a anomalia geoquímica (Zhang et al, 2023).

No entanto, apesar das definições de BG e BL já terem sido delimitadas, essas abordagens são ocasionalmente empregadas como sinônimos em pesquisas. Por isto, os trabalhos de Reimann e Garrett (2005), Rodrigues e Junior (2009) e Belbèze et al. (2023), se propõem a explicar a definição e evolução desses conceitos. De forma resumida, o cerne da diferença entre baselines e backgrounds está na origem das amostras e no uso dos dados (Figura 04).

Figura 04: Diferenças na Origem e Uso de Dados entre Valores de Fundo (Background) e Linhas de Base Geoquímicas



Fonte: Adaptado de Belbèze, 2023.

Nesse contexto, o estabelecimento de BL para solos, sedimentos e água tem sido cada vez mais adotado pela comunidade científica internacional. Albanês et al. (2008), utilizaram a metodologia de BL para avaliar os teores de EPTs em amostras de sedimentos de riachos na região da Campânia, Itália. Beata, Cezary e Jaroslaw (2019), aplicaram essa abordagem na avaliação de amostras de solo e sedimentos de rios em áreas agrícolas da Polônia. Santos-Francés et al. (2017), investigaram a poluição em amostras de solo da Cordilheira dos Andes, no Peru, enquanto Li et al. (2021), analisaram um solo calcário em uma área agrícola na China. De modo geral, esses estudos demonstram a eficácia do método para distinguir elementos em seu estado natural daqueles enriquecidos por atividades humanas.

No Brasil a utilização do método de BL em comparação ao de BG é ainda incipiente, destacam-se alguns trabalhos como: Pinto et al. (2019), com valores de BG para amostras de sedimentos da baía de Sepetiba, RJ. Rodrigues et al. (2013), os quais trabalharam com amostras de sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, em Minas Gerais. Sahoo et al. (2020), os quais trabalharam com amostras de solo da área de uma das sub-bacias do rio Itacaiúnas em Parauapebas, Pará. Destacam-se ainda os trabalhos realizados por Fernandes et al. (2018) e Gonçalves et al. (2022), ambos trabalhos propuseram valores de BG para solos do estado do Pará e são pesquisas amplamente referenciadas, entretanto ainda não se tornaram normas estaduais.

No que se refere à aplicação da metodologia BL, destacam-se pesquisas como a de Quaresma (2019), que avaliou baselines geoquímicos em amostras de água da bacia do rio Parauapebas. Silva (2019), também conduziu um estudo na bacia do rio Itacaiúnas. Já a pesquisa de Souza-Filho et al. (2022), foi desenvolvida com amostras de solo e sedimentos coletadas na mesma bacia hidrográfica. Todos esses estudos foram realizados na Província Mineral de Carajás, uma região que abrange diversos municípios do sudeste do estado do Pará.

Esses estudos demonstraram a eficácia do método BL na definição de um referencial, considerado como teor limite a ser aceito como normal para uma determinada região antropizada. No entanto, esse referencial nem sempre está em conformidade com legislações estaduais, as quais, por terem um escopo menos regionalizado e visarem representar áreas mais amplas, podem apresentar valores divergentes.

Quanto as metodologias propostas para a obtenção de valores de baseline, destacam-se de acordo com Ander et al. (2013), Reimann and Caritat (2017) e Reimann et al. (2018), as seguintes técnicas: técnica iterativa  $2\sigma$ , método de Tukey (TIF), Med + 2 MAD e percentis 90% e 98%. Essas técnicas são utilizadas tanto para cálculos de BG, quanto para cálculo de BL, a exemplo do observados em Pinto et al. (2019), Rodrigues et al. (2013), Sahoo et al. (2020), Quaresma (2019), Silva (2019) e Souza-Filho et al. (2022), entretanto elas serão descritas de forma mais detalhada no capítulo seguinte.

## REFERÊNCIAS

ALAGOAS. Conselho Estadual de Proteção Ambiental – CEPRAM. Resolução CEPRAM nº 15, de 25 de agosto de 2020. **Estabelece os Valores Orientadores de Qualidade do Solo do Estado de Alagoas quanto à presença de metais pesados.** Maceió, 2020.

ALBANÊS, S.; CICCHELLA, D.; LIMA, A.; DE VIVO, B. Urban geochemical mapping. In: DE VIVO, B.; BELKIN, H. E.; LIMA, A. (Eds.). *Environmental Geochemistry: Site Characterization, Data Analysis and Case Histories*. Vol. 8. Amsterdam: Elsevier B.V., 2008. p. 153–174.

ALI, Md Mohsin; ISHIGA, Hiroaki; WAKATSUKI, Toshiyuki. Distribution and changes in heavy metal contents of paddy soils in different physiographic units of Bangladesh. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 49, n. 4, p. 527-538, 2003).

ANDER, E. Louise et al. Methodology for the determination of normal background concentrations of contaminants in English soil. *Science of the Total Environment*, v. 454, p. 604-618, 2013.

ANTONIADIS, Vasileios; GOLIA, Evangelia E. Spatial and temporal assessment of cadmium and chromium contamination in soils in the Karditsa region (Central Greece). *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 3820-3827, 2021.

ARAÚJO, Wilson Sant'Anna de; BRASIL DO A. SOBRINHO, Nelson Moura. **Influência das propriedades físicas e químicas de solos intemperizados na adsorção de chumbo, cobre e zinco**. *Floresta e Ambiente*, v. 7, n. 1, p. [páginas], jan.-dez. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/PRn8KJRSxGxhnP7Dmg3dMrh/?lang=pt>.

ARUTA, Antonio et al. A new approach to assess the degree of contamination and determine sources and risks related to PTEs in an urban environment: the case study of Santiago (Chile). *Environmental Geochemistry and Health*, v. 45, n. 2, p. 275-297, 2023.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT)**. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BEATA, Labaz; CEZARY, Kabala; JAROSLAW, Waroszewski. Ambient geochemical baselines for trace elements in Chernozems—approximation of geochemical soil transformation in an agricultural area. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 1, p. 19, 2019.

BELBÈZE, Stéphane et al. Defining urban soil geochemical backgrounds: A review for application to the French context. *Journal of Geochemical Exploration*, p. 107298, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107298>.

**BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Estabelece critérios e valores orientadores de qualidade do solo. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

**BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 460, de 30 de dezembro de 2013. Dispõe sobre padrões de qualidade ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 dez. 2013.

**BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)**. Instrução Normativa nº 6, de 15 de fevereiro de 2014. Regulamenta o Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (RAPP). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 fev. 2014.

**BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).** Portaria nº 85, de 17 de outubro de 1996. Dispõe sobre o controle de poluição por metais pesados em efluentes e corpos d'água. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 out. 1996.

**BRASIL.** Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

**BRASIL.** Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 set. 1981.

CAPORALE, Antonio G.; VIOLANTE, Antonio. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments. **Current Pollution Reports**, v. 2, p. 15-27, 2016.

CARMO, Monique Bruna Silva; COSTA, Sandra Maria Fonseca da. Os paradoxos entre os urbanos no município de Barcarena, Pará. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 8, p. 291-305, 2016. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.008.003.AO01>.

CARVALHO, Mayara de Almeida Ribeiro; BOTERO, Wander Gustavo; DE OLIVEIRA, Luciana Camargo. Natural and anthropogenic sources of potentially toxic elements to aquatic environment: a systematic literature review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 34, p. 51318-51338, 2022.

CASTRO, Edna; SÁ MAIA, Maria Lúcia. Industrialização e Grandes Projetos. Desorganização e reorganização do espaço. In: CASTRO, Edna; MOURA, Edila; SÁ MAIA, Maria Lúcia (Orgs.). **Industrialização e Grandes Projetos: Desorganização e reorganização do espaço**. Belém: UFPA, 1995. p. 91-121.

CHAKRABORTY, Tapos Kumar et al. Receptor model-based sources and risks appraisal of potentially toxic elements in the urban soils of Bangladesh. **Toxicology Reports**, v. 10, p. 308-319, 2023.

COELHO, Maria Célia Nunes et al. Regiões econômicas minero-metalúrgicas e os riscos de desastres ambientais das barragens de rejeito no Brasil. **Revista da ANPEGE**, v. 13, n. 20, p. 83-108, 2017.

COELHO, Maria Célia; DE ABREU MONTEIRO, Maurilio; SANTOS, Ivaneide Coelho. Políticas públicas, corredores de exportação, modernização portuária, industrialização e impactos territoriais e ambientais no município de Barcarena, Pará. **Novos Cadernos NAEA**, v. 11, n. 1, 2009. <http://dx.doi.org/10.5801/ncn.v11i1.264>.

CONAMA. **Resolução No 420 de 28 de dezembro de 2009**; Diário Oficial da União: Brasília, Brazil, 2009.

COSTA, Rubia Darivanda Silva et al. Teores naturais de metais pesados em solos da região Sul do Estado do Amazonas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 6, p. 3499-3514, 2017.

**CUNHA, Cecília Maria Corrêa et al.** *Vulnerabilidade ambiental no município de Barcarena-PA: Análise da erosão nas praias do Caripí e da Vila do Conde*. Trabalho de conclusão do Curso (grau de Tecnólogo em Geoprocessamento). Universidade Federal do Pará, Ananindeua. 2019.

DA SILVA, Flávia Adriane Oliveira. Por uma gestão das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Murucupi-Barcarena-PA. 2012. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. Disponível em: <<https://ppgeo.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2010/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20FL%C3%81VIA%20ADRIANE.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2024.

DAMINATO, Bianca; BENITIZ, Leticia. **Caracterização das movimentações de fertilizantes no Brasil**. Grupo de Extensão e Pesquisa em Logística Agroindustrial–ESALQ-LOG, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 28, 2015.

DE LIMA RODRIGUES, Aline Sueli et al. Background values for chemical elements in sediments of the Gualaxo do Norte River Basin, MG, Brazil. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 15-32, 2013.

DE MATOS, Gilson Sergio Bastos et al. Soil potentially toxic element contents in an area under different land uses in the Brazilian Amazon. **Heliyon**, v. 9, n. 6, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17108>.

DÍAZ ALARCÓN, Jhonathan A.; FONSECA ALFONSO, Paola M.; VERGARA GÓMEZ, Inés; DÍAZ LAGOS, Mercedes; VIDEIRA-QUINTELA, Diogo; MONTALVO, Gemma. Assessment of potentially hazardous elements in soils of the Boyacá industrial corridor (Colombia) using GIS, multivariate statistical analysis, and geochemical indexes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 269, 2024. 115725. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115725.

DIXIT, Ruchita et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. **Sustainability**, v. 7, n. 2, p. 2189-2212, 2015.

**DOS SANTOS, Thiago Adriano Viana; NASCENTES, Zama Caixeta.** Afundar ou emergir: comunicação de risco e resposta à crise no caso do naufrágio do navio Haidar, em Barcarena (PA). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DA COMUNICAÇÃO, 42.**, 2019, Belém. Anais [...]. São Paulo: Intercom, 2019. Disponível em: <<https://portalintercom.org.br/anais/nacional2019/resumos/R14-1298-1.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2024.

FERNANDES, Antonio Rodrigues et al. Quality reference values and background concentrations of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 190, p. 453-463, 2018.

GALÁN, Emilio et al. A methodological approach for the evaluation of soil pollution by potentially toxic trace elements. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 203, p. 96-107, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.04.005>.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Priority List of Hazardous Substances**. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html>>. Acesso em: 24 out. 2024.

GERALDINE, Maria; SILVA, Vitor Hugo Galdino da. **Comportamento das movimentações de exportação de grãos do Mato Grosso**. 2016. Relatório técnico – ESALQ-LOG, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/2016/09/TRABALHO-DOS-NOVOS-MARIA-E-VITOR.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2024.

GOMES, Hannah Martins; RODRIGUES, Victória Marinho; FERREIRA, Adriano Fernandes. Mineradoras Em Barcarena No Pará: A Reação Do Direito Internacional. **Revista Jurídica UniFCV**, v. 3, n. 1, p. 25-25, 2020.

GONÇALVES, Deyvison Andrey Medrado et al. Geochemical background for potentially toxic elements in forested soils of the state of Pará, Brazilian Amazon. **Minerals**, v. 12, n. 6, p. 674, 2022.

GUAN, Qingyu et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soil of Wuwei, China: Comparison of three receptor models. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117792, 2019.

HAZEU, Marcel Theodoor; GAYOSO DA COSTA, Solange M<sup>a</sup>. **Amazônia em guerra: (re)existência e disputa territorial em Barcarena**. 1. ed. Belém, PA: Paka-Tatu, 2022. 142 p.

**INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE**. Produto Interno Bruto dos Municípios: Barcarena, PA. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasilia/pa/barcarena/panorama>>.

ISLAM, Saiful; AHMED, Kawser; AL-MAMUN, Habibullah. Distribution of trace elements in different soils and risk assessment: a case study for the urbanized area in Bangladesh. **Journal of geochemical exploration**, v. 158, p. 212-222, 2015.

LEMONS, Marcos Antonio de Queiroz; PIMENTEL, Márcia Aparecida da Silva. Mineração e desastres ambientais com rejeitos de bauxita e caulim no município de Barcarena-Pará-Brasil-Amazônia. **Territorium**, n. 28 (I), p. 137-156, 2021. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_28-1\\_8](https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-1_8).

LI, Qi et al. Geochemical baseline establishment and source-oriented ecological risk assessment of heavy metals in lime concretion black soil from a typical agricultural area. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 13, p. 6859, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18136859>.

MARTÍN, José Antonio Rodríguez; ARIAS, Manuel López; CORBÍ, José Manuel Grau. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geochemical methods to study spatial variations. **Environmental pollution**, v. 144, n. 3, p. 1001-1012, 2006.

MATOS, A. C. S. et al. Bauxite and alumina productive process: socioenvironmental impacts, forms of mitigation and the case of barcarena, Pará, Brazil. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 29644-29654, 2020.

MCBRIDE, Murray B. **Environmental chemistry of soils**. 1994.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011. **Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH nº 2/2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos**. Belo Horizonte, 2011.

**MOREIRA, Camila Campos Lopes**. *Valores de Referência de Qualidade para Metais Pesados em Solos de Mangue do Estado do Ceará: Subsídios para gestão da zona costeira*. 2014. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

**MOURA, Adriano Barboza**. *Valores de referência de qualidade (VRQs) de metais pesados para os principais tipos de solos de Alagoas*. Tese de Doutorado (Produção Vegetal). Universidade Federal de Alagoas, Rio Claro. 2018.2018.

MURTAZA, Ghulam et al. Soil contaminants: sources, effects, and approaches for remediation. **Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes: Volume 2**, p. 171-196, 2014.

NAHUM, João Santos. Usos do território, modernização e ações políticas conservadoras em Barcarena-PA. **Geosul**, v. 23, n. 45, p. 65-84, 2008.

NASCIMENTO, Nádia Socorro Fialho; HAZEU, Marcel Theodoor. Grandes empreendimentos e contradições sociais na Amazônia: a degradação da vida no município de Barcarena, Pará. **Argumentum**, v. 7, n. 2, p. 288-301, 2015.  
<https://doi.org/10.18315/argumentum.v7i2.10533>.

NAVAS, Ana; MACHÍN, Javier. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragon (northeast Spain): controlling factors and environmental implications. **Applied geochemistry**, v. 17, n. 8, p. 961-973, 2002.

NUGRAHA, Eka Djatnika et al. Heavy metal assessments of soil samples from a high natural background radiation area, Indonesia. **Toxics**, v. 10, n. 1, p. 39, 2022.

PARAÍBA. **Diário Oficial do Estado da Paraíba, João Pessoa, PB, ano 2018, n. 3602, 18 dez. 2014**. Disponível em: <https://static.paraiba.pb.gov.br/2014/12/Diario-Oficial-18-12-2014.pdf>. Acesso em: [30] [novembro] [2024].

PAYE, Henrique de Sá et al. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 2041-2051, 2010.

PEREIRA, Maria das Graças da Silva; MAGALHÃES, Sonia Barbosa. Da resistência silenciosa ao grito das águas: elementos autoetnográficos (da atualização) de um conflito. In: **GRANDES PROJETOS NA AMAZÔNIA: A ECOLOGIA POLÍTICA DOS DANOS E CONFLITOS SOCIOAMBIENTAIS**, v. 1. 2023. Editora Científica Digital. ISBN 978-65-5360-260-1. Disponível em: <[www.editoracientifica.com.br](http://www.editoracientifica.com.br)>. Acesso em: 20 out. 2024.

PERNAMBUCO. Agência Estadual de Meio Ambiente – CPRH. Instrução Normativa CPRH nº 07, de 7 de julho de 2014. **Estabelece os Valores de Referência da Qualidade do Solo (VRQ) do Estado de Pernambuco quanto à presença de substâncias químicas para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas.** Recife, 2014.

PINTO, ANITA FERNANDES SOUZA et al. Background concentrations of chemical elements in Sepetiba Bay (SE Brazil). **Journal of Sedimentary Environments**, v. 4, n. 1, p. 108-123, 2019.

PONTES, Izabele Cristine Correa. Antropogeomorfologia em área de mineração: modificações na forma do relevo e impactos no município de Barcarena-PA. **Revista GeoAmazônia**, v. 11, n. 22, p. 198-219, 2023. <http://dx.doi.org/10.18542/geo.v11i22.15112>.

POURRET, Olivier; BOLLINGER, Jean-Claude; VAN HULLEBUSCH, Eric D. On the difficulties of being rigorous in environmental geochemistry studies: some recommendations for designing an impactful paper. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 1267-1275, 2020.

POURRET, Olivier; HURSTHOUSE, Andrew. It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. **International journal of environmental research and public health**, v. 16, n. 22, p. 4446, 2019.

PRESTON, Welka et al. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1028-1037, 2014.

PRIYA, A. K. et al. Clean-up of heavy metals from contaminated soil by phytoremediation: A multidisciplinary and eco-friendly approach. **Toxics**, v. 11, n. 5, p. 422, 2023.

QUARESMA, L. S. Qualidade química da água superficial e valores de baseline geoquímico na bacia do rio Parauapebas, Carajás, sudeste da Amazônia (Surface water chemical quality and geochemical baseline values in the Parauapebas river basin, Carajás, southeastern Amazonia). [Dissertação de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais] – Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV-DS), Belém, 2019.

RAHMAN, Zeeshanur; SINGH, Ved Pal. Assessment of heavy metal contamination and Hg-resistant bacteria in surface water from different regions of Delhi, India. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 25, n. 8, p. 1687-1695, 2018.

RAHMAN, Zeeshanur; SINGH, Ved Pal. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, p. 1-21, 2019.

REBÊLO, Ananda Gabrielle de Matos et al. Valores de referência da concentração de metais pesados em solos na Amazônia Central. **Química Nova**, v. 43, p. 534-539, 2020.

REIMANN, Clemens et al. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. **Applied geochemistry**, v. 88, p. 302-318, 2018.

REIMANN, Clemens; DE CARITAT, Patrice. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. **Science of the Total Environment**, v. 578, p. 633-648, 2017.

REIMANN, Clemens; GARRETT, Robert G. Geochemical background—concept and reality. **Science of the total environment**, v. 350, n. 1-3, p. 12-27, 2005.

RIO GRANDE DO SUL. Fundação Estadual de Proteção Ambiental – FEPAM. **Portaria FEPAM nº 85, de 26 de dezembro de 2014**. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://www.fepam.rs.gov.br/upload/arquivos/202301/27114351-portaria085-2014.pdf>.

RODRIGUES, Aline Sueli de Lima; NALINI JÚNIOR, Hermínio Arias. Valores de background geoquímico e suas implicações em estudos ambientais. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, p. 155-165, 2009.

RODRIGUES, Hellem Cristina Teixeira et al. Análise da vulnerabilidade ambiental do município de Barcarena-PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1598-1612, 2020.

**RODRIGUES, Niriele Bruno**. *Mapeamento digital e valores de referência de qualidade de metais pesados em solos das regiões do Norte e Noroeste, RJ*. Dissertação de Mestrado (Pedologia e Física do Solo). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Seropédica. 2020.

SAHOO, Prafulla Kumar et al. Source and background threshold values of potentially toxic elements in soils by multivariate statistics and GIS-based mapping: a high density sampling survey in the Parauapebas basin, Brazilian Amazon. **Environmental geochemistry and health**, v. 42, n. 1, p. 255-282, 2020.

SANTA CATARINA. Instituto do Meio Ambiente – IMA. Portaria IMA nº 45, de 19 de março de 2021. **Aprova valores orientadores de qualidade dos solos e águas subterrâneas de Santa Catarina**. Florianópolis, 2021.

SANTOS, Sabrina Novaes dos. Valores de referência de metais pesados em solos de Mato Grosso e Rondônia. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SANTOS-FRANCÉS, Fernando et al. Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the Andes mountain range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). **International journal of environmental research and public health**, v. 14, n. 8, p. 859, 2017.

SÃO PAULO. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. **Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2014. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/wp-content/uploads/sites/18/2014/12/valores-orientadores-nov-2014.pdf>.

SAPPA, Giuseppe; BARBIERI, Maurizio; ANDREI, Francesca. Assessment of trace elements natural enrichment in topsoil by some Italian case studies. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 8, p. 1409, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03214-y>.

SCHMITT, H. W.; STICHER, H. **Heavy metal compounds in the soil**. 1991.

SELVAGGI, Roberta et al. Evaluation of geochemical baselines and metal enrichment factor values through high ecological quality reference points: a novel methodological approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 930-940, 2020.

**SILVA, Gessica da Silva**. *Baselines geoquímicos e avaliação da qualidade química da água superficial na sub-bacia do médio rio Itacaiúnas, região de Carajás - PA*. 2019. [Dissertação de Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais] – Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV-DS), Belém, 2019.

SILVA, Laércio Santos et al. Heavy metal contents in Latosols cultivated with vegetable crops1. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 4, p. 391-400, 2016.

SILVEIRA, Maria Lucia; ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciú; CHANG, Andrew. Condicionadores químicos de solo e retenção e distribuição de cádmio, zinco e cobre em Latossolos tratados com bio sólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1087-1098, 2008.

SINGH SIDHU, G. P. Heavy Metal Toxicity in Soils: Sources, Remediation Technologies and Challenges. **Advances in Plants & Agriculture Research**, 5 (1). 2016.

SINGH, Veer et al. Heavy metal contamination in the aquatic ecosystem: toxicity and its remediation using eco-friendly approaches. *Toxics*, v. 11, n. 2, p. 147, 2023.

SOUZA, Lucas Anjos de et al. Tolerância e potencial fitorremediador de *Stizolobium aterrimum* associada ao fungo micorrízico arbuscular *Glomus etunicatum* em solo contaminado por chumbo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1441-1451, 2011.

SOUZA-FILHO, Pedro Walfir Martins et al. Methodological approach and general guidelines to geochemical mapping and background-baseline analysis for environmental assessment: a case study in the Carajás Mineral Province, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 52, n. 4, p. e20220018, 2022.

TCHOUNWOU, Paul B. et al. Heavy metal toxicity and the environment. **Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology**, p. 133-164, 2012.

THALASSINOS, Georgios et al. Potentially toxic elements: a review on their soil behavior and plant attenuation mechanisms against their toxicity. **Agriculture**, v. 13, n. 9, p. 1684, 2023.

ZENG, Luping et al. Distribution of heavy metals in soils and vegetables and health risk assessment in the vicinity of three contaminated sites in Guangdong Province, China. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 24, n. 7, p. 1901-1915, 2018.

ZHANG, Jun et al. Environmental geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in farmland soil of typical coal-based cities: A case study of Suzhou City in Anhui Province, China. **Heliyon**, v. 9, n. 4, 2023.

ZHAO, F. J.; MCGRATH, S. P.; MERRINGTON, G. Estimates of ambient background concentrations of trace metals in soils for risk assessment. **Environmental Pollution**, v. 148, n. 1, p. 221-229, 2007.

ZINN, Yuri Lopes et al. Soil parent material is the main control on heavy metal concentrations in tropical highlands of Brazil. **Catena**, v. 185, p. 104319, 2020.

ZULKERNAIN, Nur Hanis; UVARAJAN, Turkeswari; NG, Chuck Chuan. Roles and significance of chelating agents for potentially toxic elements (PTEs) phytoremediation in soil: A review. **Journal of environmental management**, v. 341, p. 117926, 2023.

## **ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E DETERMINAÇÃO DE BASELINES GEOQUÍMICOS NO SOLO DE BARCARENA, PARÁ.**

### **INTRODUÇÃO**

Atualmente o município de Barcarena é um importante polo industrial do estado do Pará, sendo sede de diversas empresas, entre algumas do ramo minero-metalúrgico (Rodrigues et al., 2019; Costa et al., 2021; Silva et al., 2023). Entretanto, tornou-se nos últimos anos, o centro de diversas discussões entre ambientalistas, associações de moradores e meios de comunicação, no que pauta a questões ambientais (Matos et al., 2020; De Matos et al., 2023).

Essas discussões são baseadas principalmente nos processos produtivos das indústrias de mineração sediadas no município. As quais atuam com o beneficiamento e a exportação de caulim, alumina, alumínio e cabos para transmissão de energia elétrica. A preocupação se dá, pois, a geração de rejeitos e águas residuais durante o processo de mineração e fundição também tem o potencial de causar impactos ambientais (Chai e Guo, 2023).

Entretanto, outras problemáticas se juntam ao cerne da discussão ambiental em Barcarena, isto pois, o município apresenta baixos níveis de saneamento, desenvolvimento social e boa parte dos resíduos sólidos é depositada em lixões a céu aberto, fatores agravados pelo crescimento populacional descontrolado (De Matos et al., 2023).

Tendo em vista todo o contexto no qual o município está inserido, uma avaliação quanto a poluição do solo se faz necessária. Segundo De Matos et al (2023), em relação à poluição do solo com elementos potencialmente tóxicos (EPT), o município de Barcarena carece de informações para apoiar ações do poder público.

No que tange a contaminação de solos em áreas urbanas, a literatura científica buscou propor técnicas que criassem níveis de referência, para alertar quanto a necessidade de intervenção do poder público. Nesse contexto, estudos como os de Albanês et al. (2008), conduzidos na Itália; Beata, Cezary e Jaroslaw (2019), realizados na Polônia; os de Santos-Francés et al. (2017), desenvolvidos no Peru; e Li et al. (2021), na China, utilizaram a metodologia de baselines geoquímicos (BL) como ferramenta de avaliação ambiental.

A metodologia de BL, foi formulada para a obtenção do limite entre teores de EPT considerados normais para áreas urbanas e aqueles considerados anômalos, que estarão acima dos valores de baseline (Belbèze et al., 2023). Logo, os BL representam as concentrações de EPTs resultantes tanto das atividades pedogênicas, quanto também de atividades antrópicas históricas na área de estudo (Galán, et al., 2019; Sappa, Barbieri e Andrei, 2020).

A partir da identificação dos valores de BL de uma região, podem ser estabelecidos padrões de qualidade do solo, níveis de referência e de intervenção (Santos-Francés et al., 2017). Com isto, os BL são importantes na legislação ambiental, que prescreve limites para elementos tóxicos em terras contaminadas e outros materiais superficiais, conforme definido pelas autoridades competentes (Salminen e Gregorauskien, 2000).

Sendo assim, a formulação de BL é essencial para definir contaminação, identificar a fonte de contaminação e estabelecer critérios confiáveis de qualidade ambiental em sedimentos e outros compartimentos ambientais (Sojka et al. 2021; Carrillo et al., 2022). Portanto, a obtenção desses valores pode ajudar a elucidar a real condição da saúde química dos solos em Barcarena.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

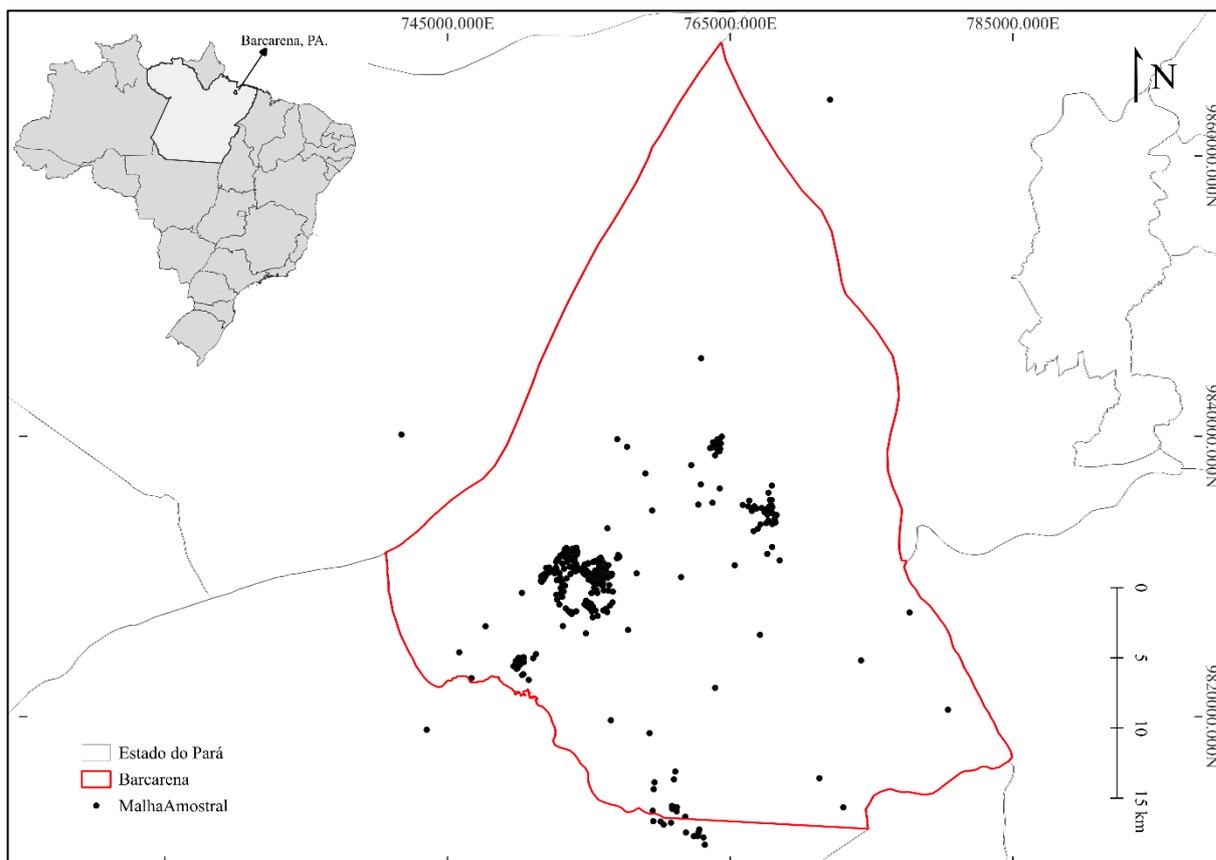
### **Área de estudo**

A área de estudo está localizada no município de Barcarena, com coordenadas 1°30'18.54"S e 48°37'32.11"O, no estado do Pará, norte do Brasil. Estando localizado a cerca de 38,2 km da capital, fazendo parte da região metropolitana de Belém. O município conta com uma população, segundo o IBGE 2022, de aproximadamente 126.650 habitantes, alocados em uma área de 1.310,338 km<sup>2</sup>.

A obtenção de amostras de solo foi realizada durante duas campanhas, a primeira realizada durante o ano de 2018, a qual contou com uma malha amostral de 418 amostras

(Figura 05). Posteriormente, já no ano de 2024 novas 35 amostragens foram realizadas, com intuito de reavaliar alguns pontos da primeira coleta, bem como melhorar a disposição da malha amostral. Algumas amostras foram ainda coletas em outro municípios vizinhos a Barcarena, a fim de comparação. Ressalta-se ainda, que essas amostragens foram realizadas por membros treinados do projeto ao qual essa pesquisa está vinculada.

Figura 05: Mapa de localização e malha amostras da área de estudo no município de Barcarena, Pará.

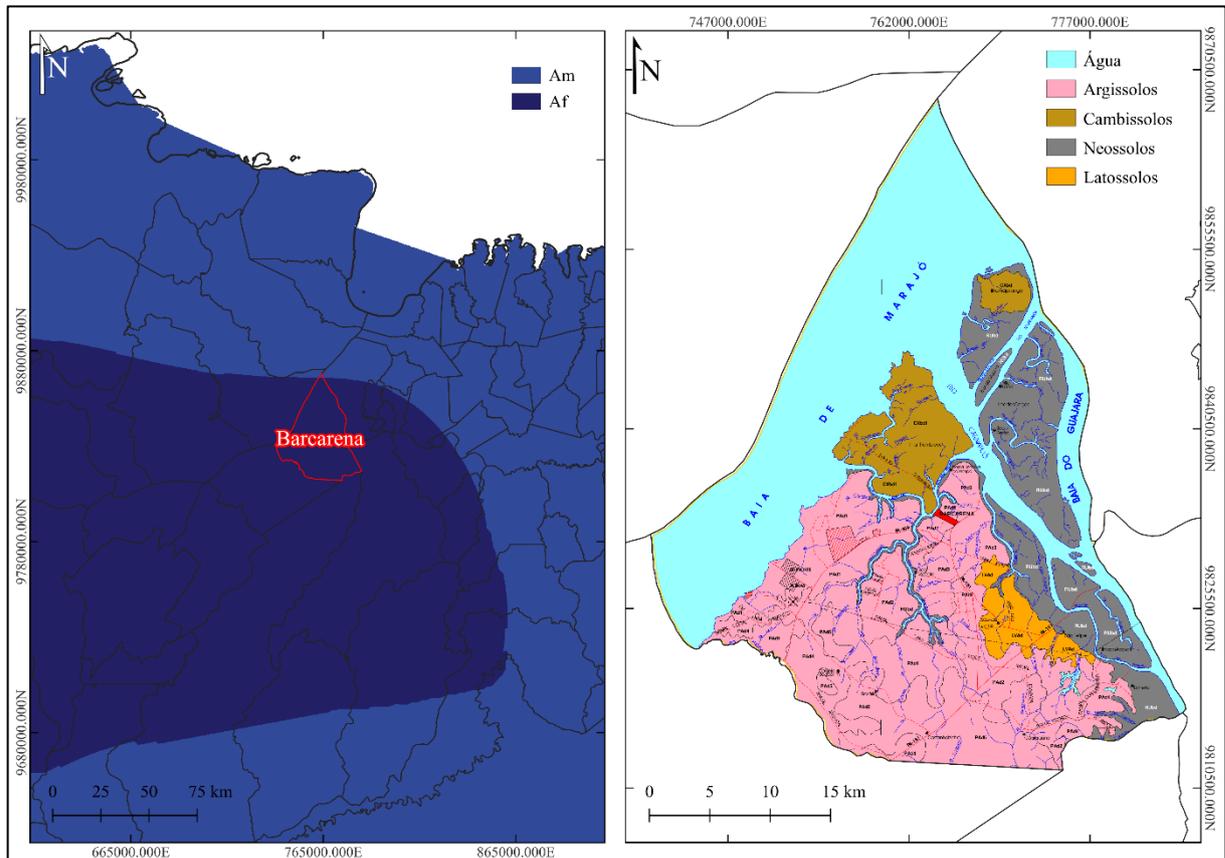


Fonte: Autor, 2025.

O clima no município, segundo a classificação Koeppen é caracterizado como clima tropical úmido ou superúmido (Af), sem estação seca (Alvares et al, 2014), como visto na figura 05. Segundo dados climáticos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a temperatura média em Barcarena é aproximadamente 27° C, com índice médio pluviométrico anual de 2,532 mm (Alvares et al., 2014).

Os solos de Barcarena segundo classificação realizada pela Embrapa em 2003, são em maior percentual representados por Argissolos amarelos distróficos, mas possuindo também uma pequena faixa de Latossolo Vermelho Amarelo, bem como Cambissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos em seu litoral e ilhas, como observado na figura 06.

Figura 06: Classificação climática segundo Koeppen e Classificação de solos segundo Embrapa 2003, referentes a área de estudo em Barcarena Pará.



Fonte: Elaboração autor, 2024. Dados processados de Alvares et al. (2014) e Embrapa (2003).

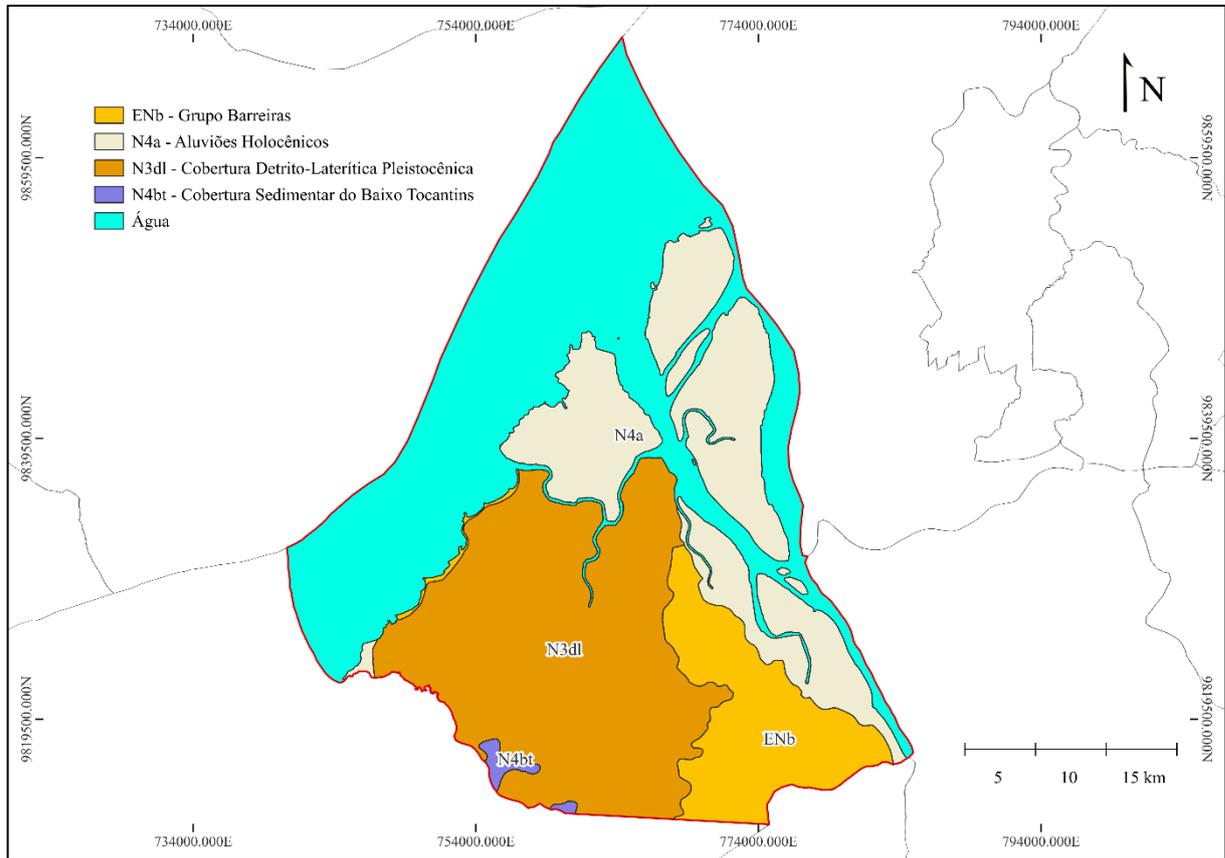
Quanto à geologia, o período Quaternário abrange extensas áreas aluviais ao longo dos rios Carnapijo, Barcarena e Itaporanga, além das baías de Marajó e do Guajará. Essas regiões correspondem a planícies de acumulação sujeitas a inundações sazonais, onde se desenvolve uma vegetação adaptada ao excesso de umidade (Santos et al., 2003). Os sedimentos predominantes nessas áreas são fluviais e incluem cascalhos, areias, siltes e argilas.

Por outro lado, o período Terciário é representado por áreas de terra firme associadas à Formação Barreiras, composta por arenitos finos, siltitos e argilitos caulíníticos, intercalados com lentes de conglomerados e arenitos grosseiros. Esses depósitos variam de pouco consolidados a friáveis, apresentando, em geral, uma estrutura maciça e estratificação horizontal (Brasil, 1974; Santos et al., 2003).

Além disso, observa-se ainda formações lateríticas que são caracterizadas pela presença de lateritos imaturos, os quais são parcialmente recobertos por latossolos. Esses solos apresentam diferentes horizontes ao longo do perfil: na porção superior, há um horizonte

argiloso rico em caulinita e gibsitita; em seguida, um horizonte ferruginoso, marcado pela presença de grandes concentrações de óxidos de ferro. Em níveis intermediários, ocorre um horizonte bauxítico, com teores elevados de gibsitita. (CD do Pará, 2016).

Figura 07: Materiais de origem geológicas encontrados no município de Barcarena, Pará.



Fonte: Autor, 2024.

### Metodologia de Amostragem de solo

Para a realização da coleta dessas amostras, foi utilizada a metodologia de amostragem direcionada. Segundo a CETESB (1999) e em conformidade com a norma ISO/DIS 10381-1, em uma amostragem direcionada, a definição da localização dos pontos de amostragem baseia-se no conhecimento prévio sobre as fontes e as vias de disseminação da contaminação, em evidências visuais de contaminação do solo ou na aplicação de métodos de screening na área. Nesse sentido, a amostragem direcionada nessa pesquisa propôs se aproximar da área industrial, das áreas urbanas, da área do lixão municipal e das principais comunidades que possam ser os focos de contaminação ou estarem sendo contaminadas por alguma atividade.

Todas as amostras foram coletadas com auxílio de um trado holandês de aço inoxidável, que fora higienizado com ácido nítrico a 5% a cada ponto. Foram obtidas em duas profundidades, uma na camada superficial do solo (0 a 20 cm) e outra na camada subsuperficial (40 a 60 cm). Em cada ponto de amostragem, dentro de uma área circular com raio de 5 metros, foram coletadas cinco amostras simples: uma no centro e as demais nos pontos cardeais (norte, sul, leste e oeste), seguindo as diretrizes de Albanese et al. (2008). As amostras simples foram então homogeneizadas para compor uma amostra representativa da área.

Em seguida as amostras foram secas ao ar e peneiradas em peneiras de 100 mesh, e enviadas a um laboratório credenciado pela NBR ISO/IEC 17025, que atesta a qualidade internacional dos laboratórios procedimentos.

### **Análises físico-químicas e de EPT's**

Quanto aos parâmetros analisados, o pH e, H<sub>2</sub>O foi determinado por potenciometria, a M.O. foi extraída pela adição de solução de dicromato de potássio e determinada por volumetria de oxirredução. Já P e K foram extraídos por meio da solução Melihch 1, posteriormente o P foi determinado por espectrofotometria, enquanto o K foi determinado por fotometria de chama. Ca, Mg e Al foram extraídos com solução a 1 Mol L<sup>-1</sup> de KCl, sendo Ca e Mg determinados por volumetria de complexação, enquanto Al determinado por volumetria de neutralização. Na análise de H+Al foi utilizada solução de acetato de cálcio a pH 7,0 e posteriormente determinada por meio da volumetria de neutralização. Todos os procedimentos de análises foram realizados de acordo com Teixeira et al., (2017). E posteriormente interpretados conforme Cravo et al., (2020) e Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999).

Quanto aos elementos potencialmente tóxicos, o método de extração da USEPA (2007) foi utilizado para determinar as concentrações de: Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Zn. Nesse método, a extração é realizada com uma mistura de ácidos fortes, como o ácido nítrico, que solubiliza os metais presentes na amostra. A solução obtida é então analisada por espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES), conforme o método EPA 6010D (USEPA, 2014), que permite a quantificação simultânea de múltiplos elementos metálicos com alta precisão.

Enquanto a extração de Hg foi realizada segundo o Método EPA 7473, no qual a amostra é aquecida a altas temperaturas para promover a vaporização do mercúrio, que é então coletado em um sistema de fluido frio. O conteúdo de Hg é determinado pela técnica de espectrometria

de fluorescência atômica de vapor frio EPA 245.7 (USEPA, 2005), onde a fluorescência gerada pelo mercúrio é medida para quantificar sua concentração.

A acurácia do método foi avaliada pelo percentual de recuperação dos elementos, sendo 121% para Al, 106% para As, 98% para Ba, 139% para Cd, 114% para Co, 104% para Cr, 108% para Cu, 113% para Fe, 94% para Pb, 94% para Ni e 104% para Zn. O material de referência utilizado foi o padrão de solo RTC - CRM 023.

## **Análise de dados**

Os dados foram inicialmente organizados em planilhas eletrônicas para facilitar sua análise. Em seguida, foi realizada uma avaliação detalhada para identificar a presença de outliers, utilizando o teste de Grubbs. Após a identificação dos valores discrepantes, foi feita uma análise criteriosa sobre a necessidade de excluir esses dados. A decisão de remover ou manter os outliers foi baseada não apenas nos aspectos estatísticos, mas também levando em consideração o histórico da área em questão e seu contexto geoquímico. Esse processo envolveu uma abordagem que integrou tanto a avaliação quantitativa dos dados quanto uma reflexão sobre os aspectos ambientais, garantindo uma análise robusta e contextualizada.

Em seguida foram realizados testes descritivos de medidas de dispersão e posição, como média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação. Bem como foi avaliada a normalidade dos dados se utilizando o teste Kolmogorov-Smirnov, que é um teste estatístico usado para comparar distribuições de dados, muito utilizado para dados não paramétricos.

A dispersão dos dados, incluindo a identificação de outliers e a avaliação da amplitude interquartílica, foi analisada por meio de gráficos de boxplot. Para verificar diferenças estatisticamente significativas entre variáveis independentes em dados não paramétricos, utilizou-se o teste de Mann-Whitney U, permitindo a comparação das médias obtidas entre as diferentes profundidades avaliadas neste estudo. Além disso, a análise de componentes principais (PCA) foi empregada nos dados padronizados para explorar as associações entre os elementos e identificar os principais fatores que influenciam o comportamento dos dados.

Para verificar a porcentagem de dados abaixo de limite de detecção, a seguinte fórmula foi utilizada:

$$\text{Percentual (\%)} = \frac{n^{\circ} \text{ amostras} < \text{LD}}{n^{\circ} \text{ total amostral}}$$

O cálculo desse percentual é necessário para seleção das variáveis que serão submetidas ao tratamento estatístico e posteriormente para os cálculos de baseline. Em seguida, foram realizados os cálculos da técnica iterativa  $2\sigma$ , método de Tukey (TIF),  $Med + 2 MAD$  e percentis 90% e 98%, para obtenção dos valores de baseline geoquímicos. De forma geral esses métodos são bem citados e explicados por com Ander et al. (2013), Reimann and Caritat (2017) e Reimann et al. (2018), além de outros trabalhos citados nesta pesquisa.

- 1) Método de Tukey (TIF): Para calcular o TIF é necessário transformar os dados para escala logarítmica na base 10, com o intuito de corrigir possíveis assimetrias. Em seguida, os dados são utilizados na seguinte fórmula:

$$TIF = Q3 + 1,5 * DI$$

Onde Q3 significa o terceiro quartil, que representa 75% dos dados e DI significa a distância interquartilica que seria a diferença entre o terceiro e o primeiro quartil. Ao final os dados são retransformados para sua escala original, e o resultado é utilizado como valor de referência (baseline).

- 2) Técnica iterativa  $2\sigma$  ( $I2\sigma$ ): calcula a média e o desvio padrão, ajustando os dados dentro do intervalo  $[média \pm 2\sigma]$ . Os valores que ficarem fora desse limite são descartados até restarem apenas os que se encaixam no intervalo, definindo a linha de base pelo limite superior.

Esse método caracteriza-se por ser mais rigoroso, geralmente fornecendo valores de baselines abaixo do que os demais métodos.

- 3) ( $Med + 2 MAD$ ): Neste método, os dados também são logaritimizados na base 10. Posteriormente é realizado o cálculo da mediana ( $Med$ ), que é resistente a outliers, como ponto central, e o desvio absoluto mediano ( $MAD$ ), que mede a dispersão em relação à mediana. Então é utilizada a seguinte fórmula:

$$Baseline = Med + 2 MAD$$

Por fim, o resultado dessa equação é retransformados para sua escala original. Essa técnica não deve ser aplicada para elementos que apresentam mais de 50% das amostras abaixo do limite de detecção.

- 4) Percentis (90% e 98%): Nesta técnica novamente os dados são logaritimizados na base 10, em seguida são calculados os percentis 90 e 98. Por fim os resultados convertidos para a unidade original.

Todos os testes estatísticos foram realizados com o software RStudio® (R Development Core Team, 2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Comportamento de atributos químicos e físicos do solo

Os solos de Barcarena apresentam características típicas da região amazônica, como acidez elevada, teores altos de Al e baixa capacidade de troca de cátions (T). As médias de pH se portaram entorno de 4,73 e 4,93, com teores de Al com médias variando entre 1,0 e 1,5  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  e de T entre 6,75 e 6,32  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  entre camadas (tabela 01). A maioria dos pontos amostrais desta pesquisa estão inseridos em áreas de Argissolos e Cambissolos, segundo Santos et al. (2003), a principal limitação desses solos é a baixa fertilidade natural, alto nível de toxicidade por alumínio e drenagem deficiente de água.

As médias de Ca, Mg e K se mantiveram em faixas consideradas baixas, enquanto a média de P se demonstrou adequada em superfície (Cravo et al., 2020). Já a matéria orgânica variou entre médias de 18,2 a 8,1  $\text{g kg}^{-1}$ , médias consideradas como boas para esse parâmetro (Ribeiro, Guimarães e Alvarez, 1999), algumas amostras coletadas em áreas periodicamente alagadas apresentaram teores altos de MO, contribuindo para o aumento da média desse parâmetro, sobre isso Amorim et al. (2009), citam que as águas mais ácidas dos rios amazônicos que tendem a preservar melhor o material orgânico.

Os principais óxidos encontrados nas amostras foram  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , alguns autores já observaram altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em relação aos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , aos quais atribuíram essa característica a materiais provenientes da formação Barreiras (Souza et al., 2015; Gonçalves et al., 2022). Além disso as altas concentrações de  $\text{SiO}_2$  em relação a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  podem estar relacionados a um baixo intemperismo por lixiviação da sílica (Rieuwerts, 2007; Fernandes et al., 2018).

Observa-se ainda um maior teor de óxido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em subsuperfície, a presença desses óxidos principalmente o de Fe tem grande influência na adsorção e mobilidade de EPTs e no solo (Alleoni et al., 2005; Campos, 2010; Siqueira, 2023). Os dados granulométricos demonstram ainda, a presença de solos mais argiloso no município, com variação de 36 a 39,75% de argila.

Tabela 1: Teores de Atributos Químicos e Físicos do Solo de Duas Profundidades em Barcarena, Pará.

Variável	0 a 20 cm			
	Média*	Máximo	Min	Desvio
pH	4,73	6,7	3,8	0,52
MO (g kg <sup>-1</sup> )	18,2	63	2,0	6,8
P (mg dm <sup>-3</sup> )	11,55	310	1,0	29,95
K (mg dm <sup>-3</sup> )	24,03	369	2,0	25,77
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,28	11,40	0,0	1,3
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,31	6	0,1	0,44
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,93	7,6	0,0	0,89
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,10	17,5	1,0	2,17
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,65	13,6	0,23	1,54
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,75	18,04	2,44	2,24
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,58	14,20	0,55	1,67
V (%)	24,08	90,3	2,0	16,57
m (%)	40,11	89	0,0	23,88
Argila (%)	36	-	-	-
SiO <sub>2</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	744,3	838	644	63,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	144,3	161	60	22,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	31,6	60	11	18,3
Variável	40 a 60 cm			
	Média*	Máximo	Min	Desvio
pH	4,93	6,9	4,3	0,36
MO (g kg <sup>-1</sup> )	8,1	23	2	5,4
P (mg dm <sup>-3</sup> )	1,77	28	1	2,99
K (mg dm <sup>-3</sup> )	16,78	172	4	20,8
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,65	22	0,2	1,95
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,19	2,1	0,1	0,24
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,82	4,5	0	0,84
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,44	28,1	1,9	5,16
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,88	22,98	0,31	2,1
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,32	29,28	2,21	5,5
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,7	23,78	0,42	2,24
V (%)	13,91	88,11	1,62	14,66
m (%)	55,26	89,61	0,00	23,65
Argila (%)**	39,75	-	-	-
SiO <sub>2</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	687,3	778	638	47,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	188,8	238	137	31,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	38,3	67	17	18,4

Fonte: Autor, 2025. \*n amostral = 415 (0-20 cm) e 138 (40-60 cm), \*\*Valores subsuperficiais conforme Santos et al. (2003).

De modo geral as concentrações pseudototais médias dos elementos são maiores na camada mais profunda do solo (40 a 60 cm), o Al por exemplo, teve um aumento de 14389 para 25219 mg dm<sup>-3</sup>, enquanto Cr aumentou de 16,33 para 25,40 mg dm<sup>-3</sup>. Das 13 variáveis apenas Cd, Cu e Zn foram maiores em superfície, com médias de 0,12 e 0,10 mg dm<sup>-3</sup> para Cd e de 13,58 e 12,99 mg dm<sup>-3</sup> para Zn, como visto na tabela 02.

Esse comportamento está em concordância com os teores mais altos de argila e principalmente óxidos de Fe e Al, que também foram observados maiores em subsuperfície. É plausível sugerir que esse comportamento esteja associado aos teores elevados de argila e, sobretudo, aos óxidos de Fe e Al, cuja concentração também se mostrou superior na

subsuperfície. Essa relação se deve ao fato de que esses parâmetros exercem uma influência significativa na adsorção desses elementos Alleoni et al., 2005; Campos, 2010; Siqueira, 2023).

Um aspecto crucial a ser ressaltado é a influência do regime hídrico na mobilidade dos metais pesados, especialmente em regiões como Barcarena, situada às margens do Rio Pará e interseccionada por uma complexa rede hidrográfica. Grande parte de seu território é periodicamente inundada devido às cheias dos rios, um fator determinante na dinâmica geoquímica do solo. Nesse contexto, a movimentação vertical dos metais pesados no perfil do solo em ambientes tropicais é amplamente controlada pelo regime hídrico local e pelas propriedades edáficas responsáveis por sua capacidade de retenção (Kashem et al., 2007).

As inundações desencadeiam uma série de transformações químicas, físicas, biológicas e mineralógicas no solo, sendo uma das mais marcantes a redução do potencial eletroquímico de elétrons, com consequente alteração do potencial redox (Lima et al., 2005). As reações de oxidação e redução desempenham um papel fundamental na mobilidade e toxicidade dos íons metálicos em solos alagados, influenciando diretamente sua biodisponibilidade e comportamento ambiental (Barcelona e Holm, 1991; Campos, 2010).

De modo geral a maioria dos parâmetros demonstrou maior variabilidade especialmente na camada superficial do solo, sendo Cd, Hg, Pb e Zn os elementos com maior coeficiente de variabilidade na superfície. Da mesma forma a curtose para esses elementos demonstrou valores altos, o que indica uma distribuição com caudas longas e picos acentuados, sugerindo que há poucas amostras com valores elevados em relação à maioria, sendo este um comportamento também maior em amostras de superfície.

O teste de normalidade K-S indica que em ambas as profundidades todas as variáveis rejeitam a hipótese de distribuição normal, apenas o parâmetro de Mo da camada superficial não demonstrou valor significativo para o teste K-S devido à baixa variabilidade de seus dados. Esse comportamento é típico de variáveis Geoquímica do solo como observado por pesquisas anteriores como Sahoo et al. (2018), Dourado (2019) e De Matos et al. (2023).

Tabela 2: Estatística descritiva dos Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) em Amostras de Solo de Duas Profundidades no Município de Barcarena.

Variável	Média	Máximo	Min	Desvio	Cv (%)	Curtose	K-S
	Amostras 0 a 20 cm						
Al	14389,02	57300,00	2950,00	7043,78	47,95	3,70	7,37E+02
As	1,57	8,25	1,00	1,13	72,17	10,52	7,71E-29
Ba	7,39	99,20	1,00	13,04	176,37	28,73	1,63E-32
Cd	<b>0,12</b>	4,13	0,10	0,27	226,96	201,68	8,62E-93
Co	1,24	10,80	1,00	0,89	71,64	64,72	5,30E-51
Cr	16,33	69,40	3,12	8,74	53,51	10,87	2,00E-02
Cu	<b>14,86</b>	333,00	1,00	21,64	145,62	116,80	3,44E-19
Fe	5977,10	44700,00	670,00	5411,79	90,54	13,58	5,41E-10
Hg	0,09	1,99	0,05	0,12	130,42	190,84	4,71E-44
Mo	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	NA
Ni	2,20	42,80	1,00	2,49	112,81	171,24	2,78E-30
Pb	3,93	62,00	1,00	6,67	169,97	41,78	3,94E-34
Zn	<b>13,58</b>	356,00	1,49	24,94	183,57	110,22	6,30E-31
Variável	Média	Máximo	Min	Desvio	Cv (%)	Curtose	K-S
Amostras 40 a 60 cm							
Al	<b>25219,67</b>	82700,00	4280,00	11061,16	43,86	1,76	4,37E+03
As	<b>2,00</b>	11,80	1,00	1,59	79,69	12,19	5,49E-20
Ba	<b>9,52</b>	163,00	1,21	15,57	163,65	47,49	5,93E-33
Cd	0,10	1,17	0,10	0,07	67,79	207,76	1,89E-93
Co	<b>1,48</b>	8,21	1,00	0,75	51,07	30,48	9,55E-20
Cr	<b>25,40</b>	81,00	6,10	10,59	41,71	3,78	2,49E+01
Cu	13,99	148,00	1,00	15,01	107,28	18,63	4,83E-08
Fe	<b>9276,84</b>	53600,00	1190,00	7504,37	80,89	11,33	3,82E-09
Hg	<b>0,13</b>	0,71	0,05	0,09	73,64	6,24	2,12E-14
Mo	<b>1,01</b>	1,40	1,00	0,03	3,47	69,27	2,00E-96
Ni	<b>3,08</b>	16,60	1,00	1,84	59,68	17,03	7,32E-05
Pb	<b>4,02</b>	74,30	1,00	5,08	126,24	101,60	1,64E-22
Zn	12,99	217,00	2,46	17,82	137,18	85,09	2,19E-22

Fonte Autor: 2025. Destaque em negrito para as maiores médias, Cv (%) – Coeficiente de variação, K-S – Teste de Kolmogorov-Smirnov.

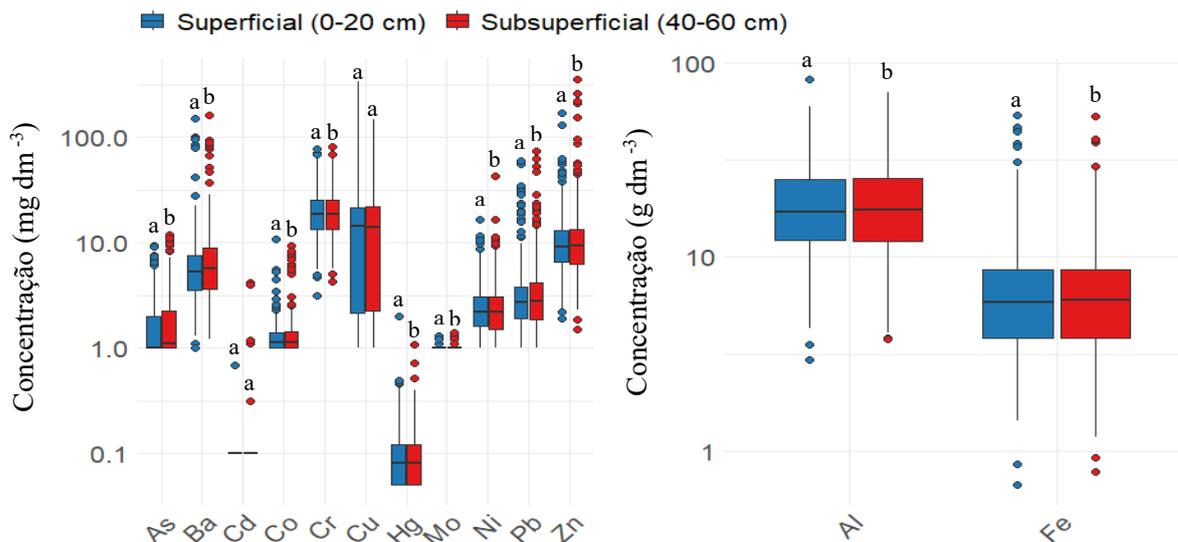
Ao analisar a distribuição interquartilica de cada elemento estudado, observa-se uma variabilidade expressiva nos resultados referentes a Cu, Hg, Pb e Zn, acentuada pela presença considerável de outliers. Essa ampla variação e a ocorrência de outliers são associadas a solos que passaram por distintos processos litológicos e geológicos ao longo do tempo (Zuo et al., 2009; Sahoo et al., 2018). Nesse contexto, como exposto anteriormente o município de Barcarena é caracterizado por quatro unidades geológicas diferentes (Freitas et al., 2021). Sugere-se que a diversidade dessas formações geológicas desempenha um papel determinante na variabilidade geoquímica observada, uma vez que a composição das rochas subjacentes influencia diretamente a distribuição dos elementos químicos no solo (Gonçalves et al., 2022).

Os resultados dos testes de Mann-Whitney U (figura 08) indicam que, apenas para Cd e Cu não houve diferença estatística entre as profundidades, essa ausência de diferenças pode estar relacionada a processo que influenciam em suas mobilidades no perfil. A matéria orgânica, bem como a variação do pH do solo são alguns exemplos de variáveis que também influenciam

nessa mobilidade (Felix, 2005; Mellis, 2006; Colzato, 2016). Todos os demais elementos analisados apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as camadas superficial (0-20 cm) e subsuperficial (40-60 cm), sugerindo influência de processos pedogenéticos, deposição atmosférica ou atividades antrópicas.

Como abordado anteriormente, a biodisponibilidade é influenciada por fatores como tipo de solo, composição química, especiação e concentração dos metais, pH, intemperismo, relação solo:solução, tempo de contato, fonte do elemento e presença de microrganismos (Vig et al., 2003; Campos, 2010). Portanto, é de suma importância o entendimento de diversos processo como geológicos e geoquímicos, que acabam por controlar a preponderância de concentrações naturais ou antrópicas dos elementos químicos em amostras de diferentes meios (Rodrigues e Junior, 2009).

Figura 08: Boxplots dos EPTs mostrando a distribuição dos elementos químicos nos solos superficiais e profundos.



Fonte: Autor, 2025. As letras a e b demonstram o resultado do teste Mann-Whitney U, no qual letras iguais indicam não haver diferença estatística entre as profundidades, enquanto letras diferentes indicam diferença estatística existente. A caixa indica aproximadamente os percentis 25, 50 (mediana = linha preta) e 75. Os outliers (marcados com pontos) são definidos de acordo com: (bigode superior, bigode inferior) = (limite superior, limite inferior)  $\pm$  1,5  $\times$  largura do limite.

Para atender às premissas da análise fatorial, os elementos Cd, Co, Hg e Mo foram previamente excluídos por possuírem um número menor de casos válidos e correlações significativas, o que poderia dificultar a formação de fatores verdadeiros. Assim, duas matrizes

foram criadas, para a avaliação individual de cada camada do solo, cada matriz de dados foi composta por nove EPTs: Al, As, Ba, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb e Zn.

A Figura 9 apresenta os gráficos das Análises de Componentes Principais para as duas profundidades, ilustrando dois fatores de influência. O primeiro fator é destacado em vermelho, enquanto o segundo é representado em azul. Esses dois fatores, em conjunto, explicam a maior parte da variabilidade observada nos dados.

Os resultados obtidos a partir das duas matrizes indicaram que os EPTs se agruparam em dois fatores distintos. Para a matriz das amostras de 0 a 20 cm, que explica 74% da variabilidade total dos dados (Figura 09), o primeiro fator, composto pelos elementos As, Ba, Cr, Fe e Ni, explica 58% da variação observada. O segundo fator, formado pelos elementos Al, Cu, Pb e Zn, representa 16% da variação. No caso da matriz das amostras de 40 a 60 cm, também responsável por 74% da variabilidade dos dados, o primeiro fator, composto por Cu, Pb e Zn, explica 53% da variação. Já o segundo fator, que inclui os elementos Al, As, Ba, Cr, Fe e Ni, representa aproximadamente 21% da variabilidade total.

O agrupamento entre Cu, Pb e Zn, foi observado nas duas profundidades, o mesmo comportamento é citado por Moura et al. (2006), em estudo realizado em teresina, os quais atribuíram os teores desse elementos a atividades urbanas. Jesus et al. (2004), atribui a presença desses elementos a sucatas de embarcações naufragadas, bem como ao lançamento de esgotos de forma irregular. Enquanto De Matos et al. (2023), em estudo no município de Barcarena, atribuíram esse comportamento ao despejo irregular de resíduos sólidos no solo. Portanto, esses elementos não estão associados a processos geoquímicos naturais nos solo, mas ao antropismo.

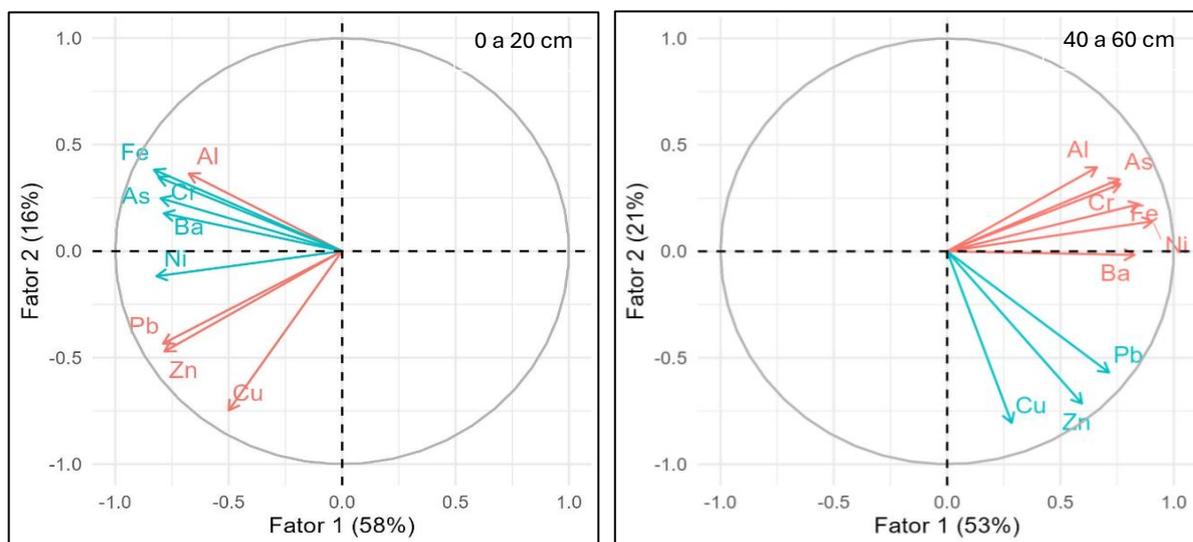
O agrupamento entre Al, As, Ba, Cr, Fe e Ni, compreende alguns elementos caracterizados como de origem geológica. Al e Fe por exemplo, constituintes de óxidos e argilominerías do solo, têm fonte definida no meio ambiente, pois fazem parte da geoquímica local de Barcarena (Pereira et al., 2007). A presença de Ba, Cr e Ni nesse agrupamento, indica que esse elemento está vinculado principalmente a associação dele a óxidos de Fe e Mn (Mellis, 2006; Madejon et al., 2012; De Matos et al., 2023). O Cr estrutural por exemplo, devido às semelhanças químicas pode ser substituído por Al e Fe durante intemperismo de minerais primários de rochas máficas e ultramáficas, tornando-se a principal fonte de Cr no solo (Chrysochoou et al., 2016; Gonçalves et al., 2022).

Estudo como de Fadigas et al, (2002), já evidenciaram altas correlações entre Ni e Cr com Fe. Enquanto As, geralmente está associados ao ambiente geológico, altos teores de As são comuns para rochas sedimentares como xisto ou fosforitos (Wenzel et al., 2013; Gonçalves et

al., 2022). Entretanto como esses materiais não são comuns em Barcarena, bem como por apresentar teores baixos e estar agrupados a Fe e Al, tem uma indicação de origem geológica em Barcarena, como observado por De Matos et al., (2023).

Ao comparar as duas matrizes, observa-se uma inversão nos fatores que as caracterizam. Na matriz correspondente à profundidade de 0 a 20 cm, o fator 1 é representado por elementos ligados à antropização e poluição, que se destacam como os mais influentes no comportamento dos dados. Em contraste, na segunda matriz, os elementos relacionados a processos pedológicos são os que demonstram maior influência na variabilidade dos dados. Essa discrepância nas representações pode refletir as alterações provocadas pelas atividades humanas, como a urbanização e a agricultura intensiva, que afetam predominantemente a camada superficial do solo. Em contrapartida, a maior contribuição de processos pedológicos na camada mais profunda sugere a preservação das características naturais do solo, como a formação e a evolução dos horizontes pedológicos, evidenciando a interação complexa entre fatores naturais e antropogênicos no ambiente.

Figura 09: Análises de Componentes Principais avaliando o comportamento dos EPTs estudados em amostras de solo do município de Barcarena, Pará.



Fonte: Autor, 2025.

### Avaliação de amostras quanto a Resolução 420 do Conama

Das amostras avaliadas segundo a Resolução 420 do CONAMA (tabela 3), na camada superficial (0 a 20 cm), observou-se os seguintes resultados:

- Cobre (Cu): 5 amostras apresentaram valores acima do Valor de Prevenção (VP), sendo: 3 localizadas na área do lixão municipal e 2 em área residencial.
- Mercúrio (Hg): 1 amostra apresentou valor acima do VP, localizada em área agrícola.
- Níquel (Ni) e Zinco (Zn): 1 amostra de cada elemento ultrapassou o VP, ambas provenientes do lixão municipal.
- Cádmio (Cd) e Cobre (Cu): 2 amostras de Cd e 1 de Cu apresentaram valores acima do Valor de Intervenção (VI) para áreas agrícolas, todas as amostras são oriundas do lixão municipal.

Enquanto na camada de subsuperfície (40 a 60 cm), foi observado o seguinte comportamento:

- Bário (Ba): 1 amostra ultrapassou o VP, localizada em área residencial.
- Cromo (Cr): 2 amostras excederam o VP, sendo: 1 em área residencial e 1 no lixão municipal.
- Cobre (Cu): 6 amostras acima do VP, sendo: 4 oriundas do lixão municipal e 2 de áreas agrícolas.
- Mercúrio (Hg): 2 amostras acima do VP, sendo: 1 em área residencial e 1 em área agrícola.
- Chumbo (Pb): 1 amostra apresentou valor acima do VP, localizada na área do lixão municipal.

Destaca-se o Cu como o EPT observado com maior número de amostras acima de VP, como também com uma amostras acima de VI. Como citado anteriormente, a liberação deste elemento, é citada na literatura internacional como sendo de exclusiva origem antrópica, pois está relacionada a diversas atividade humanas Moura et al. (2006). Quando em excesso no ambiente, esse elemento pode causar danos severos às plantas, como necrose das folhas, desfolhamento precoce e diminuição do crescimento da planta. (Silva et al., 2014) . Em seres humanos, a contaminação com cobre (Cu) leva a graves complicações à saúde, podendo causar câncer e até mesmo a morte (Andrezza et al., 2013).

Quanto aos resultados obtidos em amostras com altas concentrações de Cd, as quais observou-se valores acima de VI para áreas agrícolas, resalta-se entretanto, que estas somente foram encontradas na área do lixão, portanto podendo ter diversas oringens. Enquanto, Cr, Hg, Ni, Pb e Zinco, todos ocupam posição na lista da ATSDR entre os elementos de maiores riscos para saúde humana e ambiental (ATSDR, 2022).

Outro ponto de destaque seria a detecção de resultados acima do normal para amostras coletadas em áreas agrícolas, teoricamente mais isoladas do centro urbano e industrial de Barcarena. Destas 3 amostras estão localizadas em áreas de comunidades agrícolas, conhecidas no município como Acuí e Arienga. Sabe-se por exemplo, que em solos de regiões tropicais, normalmente necessitam de grandes quantidades de corretivos e de fertilizantes (Sobrinho et al., 1992; Morreira, 2001). Além disso, alguns desses EPTs são constituintes das formulações de muitos fungicidas, inseticidas, fertilizantes (químico e orgânico) e corretivos do solo (Filho et al., 2014). Por esse motivo essa pode ser uma das possíveis origens desse resultados. Entretanto, a proximidades dessas áreas com usinas e refinarias deve ser melhor investigada, para identificação precisa da origem desses teores elevados.

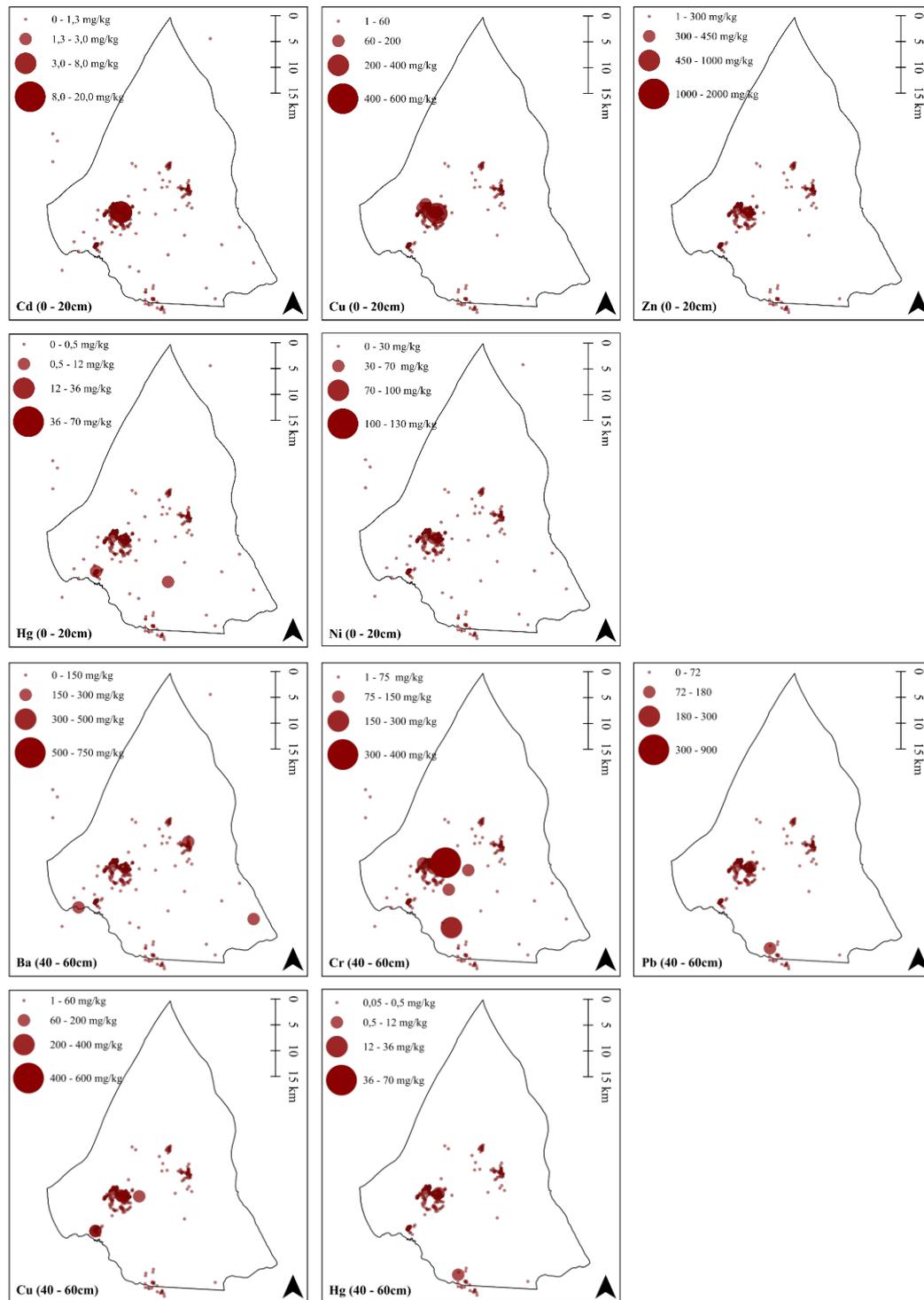
Tabela 3: Relação de amostras acima dos valores de prevenção e intervenção previstos na resolução do Conama 420/2009.

Profundidade de 0 a 20 cm			Profundidade de 40 a 60 cm		
EPT	VP	VI-Agri	EPT	VP	VI-Agri
Cd	-	310 e 320	Ba	214	-
Cu	119, 203, 225, 310 e 320	127	Cr	198 e 315	-
Hg	296	-	Cu	118, 127, 279, 280, 310 e 320	-
Ni	310	-	Hg	6 e 124	-
Zn	320	-	Pb	320	-
118, 119, 127, 310, 315 e 320			Área do Lixão		
124, 198, 203, 214 e 225			Área Residencial		
6, 279, 280 e 296			Área Agrícola		

Fonte: Autor, 2025.

Por fim, conforme destacado por De Matos et al. (2023), o município de Barcarena enfrenta desafios significativos relacionados à infraestrutura de saneamento básico e ao desenvolvimento social, apresentando índices reduzidos nesses aspectos. Além disso, grande parte dos resíduos sólidos gerados na região é descartada em lixões a céu aberto, uma prática que se torna ainda mais preocupante diante do crescimento populacional desordenado. A pesquisa também evidencia que a área do lixão municipal representa a principal fonte de contaminação por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) no município, um problema agravado pela proximidade desse local em relação às áreas residenciais e aos corpos hídricos, ampliando os riscos ambientais e à saúde pública. A localização dessas amostras no mapa do município pode ser observada na figura 10.

Figura 10: Mapa de anamorfose pontual classificado segundo as faixas da resolução Conama 420/2009, para os teores dos elementos avaliados em amostras de solo de Barcarena, Pará.



Fonte: Autor, 2025.

## Baselines Geoquímicos para o Município de Barcarena

De acordo com Ander et al. (2013), Reimann and Caritat (2017) e Reimann et al. (2018), variáveis que possuam percentuais acima de 50% das amostras abaixo do limite de detecção não devem ser utilizadas para proposição de cálculos de baselines. Deste modo, após o cálculo desse percentual, foram retirados dos cálculos as variáveis: As, Cd, Co e Mo, os quais ultrapassaram esse limite (tabela 04). Todos os outros elementos seguiram para proposição de BL.

Tabela 4: Tabela descritiva dos percentuais de amostras abaixo do limite de detecção para os elementos avaliados nos solos de Barcarena, Pará.

Unidade	Elemento	%<LD	Unidade	Elemento	%<LD
	As (0-20 cm)	<b>58,61</b>		Hg (40-60 cm)	9,09
	As (40-60 cm)	44,98		Mo (0-20 cm)	<b>98,8</b>
	Ba (0-20 cm)	0,48		Mo (40-60 cm)	<b>97,12</b>
	Ba (40-60 cm)	0		Ni (0-20 cm)	10,96
	Cd (0-20 cm)	<b>99,04</b>		Ni (40-60 cm)	0,95
	Cd (40-60 cm)	<b>99,52</b>		Pb (0-20 cm)	11
	Co (0-20 cm)	<b>59,33</b>		Pb (40-60 cm)	3,83
	Co (40-60 cm)	21,77		Zn (0-20 cm)	0
	Cr (0-20 cm)	0		Zn (40-60 cm)	0
	Cr (20-40 cm)	0		Al (0-20 cm)	0
	Cu (0-20 cm)	3,83		Al (40-60 cm)	0
	Cu (40-60 cm)	6,93		Fe (0-20 cm)	0
	Hg (0-20 cm)	43,3		Fe (40-60 cm)	0

Fonte: Autor, 2025.

Os métodos do percentil 98º, TIF e Med + 2 MAD foram considerados os mais tolerantes, uma vez que resultaram nos maiores valores de BL. No entanto, observou-se várias discrepâncias entre eles. Por exemplo, para o elemento Ba na profundidade de 0 a 20 cm, o método do percentil 98º resultou em um BL de 61,24 mg dm<sup>-3</sup>, enquanto o método TIF gerou um valor significativamente menor de 24,41 mg dm<sup>-3</sup> e o método Med + 2 MAD apresentou um BL ainda mais baixo, de 15,42 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela 05). Já para o parâmetro Cu na profundidade de 40 a 60 cm, o comportamento desses métodos foi ainda mais discrepante, com o percentil 98º gerando um BL de 35,51 mg dm<sup>-3</sup>, enquanto os métodos TIF e Med + 2 MAD apresentaram valores muito superiores, de 715 mg dm<sup>-3</sup> e 209 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente (tabela 05). Essa

variação sugere que esses métodos podem ter um comportamento menos preciso para determinadas variáveis.

Além disso, esses métodos apresentaram diferenças na classificação das amostras em relação aos valores de BL estabelecidos. O método do percentil 98º indicou que a proporção de amostras acima do BL variou de 1,9% para Hg na profundidade de 0 a 20 cm, até 4,5% para Ba na profundidade de 40 a 60 cm. Por sua vez, o método Med + 2 MAD apontou uma variação entre 0% para Cu na profundidade de 0 a 20 cm e 23,7% para Hg na mesma profundidade. Já o método TIF identificou entre 0% para Cu na profundidade de 0 a 20 cm e 6,2% para Pb na mesma profundidade (Tabela 05).

Por outro lado, o método do percentil 90º demonstrou ser uma abordagem intermediária, apresentando valores de BL que se situam entre os obtidos pelos demais métodos. Em termos de rigor, foi o mais restritivo apenas para três variáveis específicas: Cu (0 a 20 cm), Hg (40 a 60 cm) e Al (0 a 20 cm), com valores de BL de 26,37 mg dm<sup>-3</sup>, 0,25 mg dm<sup>-3</sup>, e 23,95 mg dm<sup>-3</sup> respectivamente. Quanto à proporção de amostras que excederam o BL, este método indicou variação entre 9,8% para Pb (0 a 20 cm) e 12,2% para Ba (40 a 60 cm), conforme os dados apresentados na Tabela 05.

Já o método I2σ foi considerado o mais rígido dentre todos os avaliados, resultando nos menores valores de BL na maioria dos casos. Para Ba na profundidade de 0 a 20 cm, por exemplo, enquanto o método do percentil 98º apresentou um BL de 61,24 mg dm<sup>-3</sup>, o método I2σ resultou em um valor muito inferior, de apenas 6,57 mg dm<sup>-3</sup>. Da mesma forma, para Zn na profundidade de 40 a 60 cm, o método I2σ produziu um BL de 15,04 mg dm<sup>-3</sup>, enquanto o método TIF gerou um valor bem mais elevado, de 38,52 mg dm<sup>-3</sup>.

No que diz respeito à classificação das amostras em relação aos valores de BL, o método I2σ identificou as maiores porcentagens de amostras acima do BL, variando entre 0,7% para Hg na profundidade de 0 a 20 cm e 30,1% para Fe na mesma profundidade.

Entretanto, esses métodos de cálculo foram utilizados por diversos autores para tanto determinação de BG, quanto para determinação BL. Fernandes et al. (2018), propôs a utilização do método de Med + 2 MAD, já Sahoo et al. (2019), utilizou entre outros métodos os métodos TIF e Med + 2 MAD. Qi et al., (2021), propôs a utilização do método de curva de frequência acumulada, método não abordado nesta pesquisa. Gonçalves et al. (2022), definiram o método TIF como o mais preciso. Enquanto Salomão et al. (2018), sugeriu o método I2σ como o melhor método na proposição de BG, em concordância com essa pesquisa. Conforme a tabela 06.

Tabela 05: Valores de Baseline geoquímicos obtidos por diferentes métodos estatísticos para solos de duas profundidades de Barcarena, Pará.

Unidade	Elemento	n°	Métodos				
			TIF	MAD	12σ	90°	98°
----- mg dm <sup>-3</sup> -----	Ba (0-20 cm)	418	24,41	15,42	<b>6,57</b>	9,84	61,24
	Ba (40-60 cm)	407	24,33	17,79	<b>9,62</b>	11,63	21,07
	Cr (0-20 cm)	412	41,85	31,13	<b>18,71</b>	24,4	33,5
	Cr (40-60 cm)	412	67,92	49,96	<b>33,79</b>	37,65	46,82
	Cu (0-20 cm)	410	542	156	29,8	<b>26,37</b>	35,51
	Cu (40-60 cm)	412	715	209	31,24	26,5	41,14
	Hg (0-20 cm)	418	0,21	<b>0,1</b>	0,31	0,15	0,24
	Hg (40-60 cm)	418	0,37	0,26	0,32	<b>0,25</b>	0,4
	Ni (0-20 cm)	416	5,5	4,04	<b>2,44</b>	3,13	9,14
	Ni (40-60 cm)	418	7,7	5,89	<b>3,9</b>	4,67	9,54
	Pb (0-20 cm)	414	9,52	6,58	<b>3,51</b>	6,2	22,99
	Pb (40-60 cm)	416	12,48	8,87	<b>5,21</b>	5,64	13,07
	Zn (0-20 cm)	412	36,63	24,9	<b>11,85</b>	21,12	40,03
	Zn (40-60 cm)	415	38,52	28,54	<b>15,04</b>	19,9	41
	--- g dm <sup>-3</sup> ---	Al (0-20 cm)	418	46,16	33,51	28,79	<b>23,95</b>
Al (40-60 cm)		418	78,61	59,65	<b>32,45</b>	40,92	50,46
Fe (0-20 cm)		416	21,56	13,58	<b>6,07</b>	9,59	25,72
Fe (40-60 cm)		417	28,96	20,8	<b>10,36</b>	15,07	38,87
Elemento		Percentual de amostras acima dos valores de BL					
	Ba (0-20 cm)	3,8	4,5	25,4	10,0	2,2	
	Ba (40-60 cm)	3,3	4,8	21,1	12,2	4,5	
	Cr (0-20 cm)	1,4	4,5	26,1	11,2	3,6	
	Cr (40-60 cm)	0,7	2,6	17,5	11,2	3,3	
	Cu (0-20 cm)	0,0	0,2	7,9	11,0	3,3	
	Cu (40-60 cm)	0,0	0,0	5,7	10,5	3,3	
	Hg (0-20 cm)	3,3	23,7	0,7	10,0	1,9	
	Hg (40-60 cm)	4,1	9,1	5,5	10,3	2,4	
	Ni (0-20 cm)	3,3	5,5	22,2	10,0	2,2	
	Ni (40-60 cm)	2,9	5,0	17,7	10,0	2,2	
	Pb (0-20 cm)	6,2	9,3	22,5	9,8	2,2	
	Pb (40-60 cm)	2,9	3,8	12,9	10,3	2,4	
	Zn (0-20 cm)	3,8	8,6	27,8	11,2	3,3	
	Zn (40-60 cm)	2,9	5,3	18,9	10,3	2,6	
	Al (0-20 cm)	0,2	1,4	4,5	10,0	2,2	
	Al (40-60 cm)	0,2	0,5	23,7	10,0	2,2	
	Fe (0-20 cm)	4,3	5,7	30,1	10,0	2,2	
	Fe (40-60 cm)	2,9	5,7	24,6	10,0	2,2	

Fonte: Autor, 2025. Em negrito: valores mais rígidos por elemento.

Os valores encontrados nesta pesquisa, de forma geral, indicaram que, para a maioria dos parâmetros analisados, os valores de baseline foram inferiores aos citados na literatura internacional. Por exemplo, Li et al. (2021), em um estudo realizado em uma região agrícola de grande importância na China, relataram valores de 66,5 mg dm<sup>-3</sup> para Cr e 29,8 mg dm<sup>-3</sup> para Ni, enquanto os resultados obtidos nesta pesquisa foram significativamente menores, de 18,71 mg dm<sup>-3</sup> e 2,44 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Da mesma forma, Santos-Francés et al. (2017), em um estudo conduzido em uma área de mineração no Peru, encontraram concentrações de 44,87

mg dm<sup>-3</sup> para Pb e 47,42 mg dm<sup>-3</sup> para Zn, valores consideravelmente superiores aos obtidos nesta pesquisa, que foram de 3,51 mg dm<sup>-3</sup> e 11,85 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente.

Enquanto, ao comparar os resultados desta pesquisa com os de Sahoo et al. (2019), observa-se uma grande discrepância para a maioria dos parâmetros analisados, o que pode estar relacionado ao contexto de mineração da Província de Carajás.

Quando comparados com estudos regionais realizados no estado do Pará, os resultados desta pesquisa se mostraram mais alinhados. Estudos conduzidos por Fernandes et al. (2018) e Gonçalves et al. (2022), no Pará apresentaram valores semelhantes para os elementos Ba, Cr, Hg, Pb, Zn e Al, dependendo do método de cálculo empregado. Entretanto, considerando que essas pesquisas foram realizadas em áreas naturais, isto é, sem influência antropogênica significativa, teoricamente os dados desta pesquisa deveriam demonstrar resultados de BL superiores, considerando a antropização histórica no município. Ressalta-se porém, que estas pesquisas foram realizadas em contextos totalmente diferentes, com área abrangente ao estado do Pará, com todas as suas variações pedogeológicas e climáticas, enquanto esta pesquisa está regionalizada no município de Barcarena.

Segundo Antoniadis e Golia (2021), estudos anteriores já demonstram que variáveis como o teor de matéria orgânica, e a capacidade de adsorção do solo, tem influência sobre a disponibilidade de EPTs. Por tanto, sugere-se que o comportamento observado nesse trabalho possa ter relação com a capacidade de adsorção dos solos amostrados em Barcarena.

Tabela 06: Comparação entre valores de BG e BL propostos pela literatura científica nacional e internacional.

Referência	Local	Método	Cálculo	Ba	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Al	Fe
Autor, 2025	Barcarena, Pará, Brasil.	BL	I2σ	I2σ	6,57	18,71	29,8	0,31	2,44	3,51	11,85	28,79
			TIF	24,41	41,85	542	0,21	5,5	9,52	36,63	46,16	21,56
Fernandes et al. (2018)	Pará, Brasil.	BG	Med+2MAD	16,94	15,49	18,46	0,18	2,16	3,33	10,78	4,62	4,67
Gonçalves et al. (2022)	Pará, Brasil.	BG	TIF	119,23	40,54	23,27	0,52	10,92	33,38	24,94	31,05	38,57
			90°	85,42	35,9	27,4	0,32	7,55	21,76	24,25	34,21	86,3
Sahoo et al. (2019)	Carajás, Pará, Brail.	BG	TIF	841,4	141,54	1216,2	-	142,89	43,71	89,13	85,11	582,1
			Med+2MAD	660,69	562,34	398,11	-	60,26	27,54	63,1	56,23	257,04
Salomão (2018)	Carajás, Pará, Brasil.	BG	I2σ	39,04	34,3	66	0,12	15,62	2,28 – 9,62	21,18	64,6	0,6
Rodrigues et al. (2013).	Minas Gerais, Brasil	BG	I2σ	129	-	-	-	35,9	43,3	62,2	-	73
Chen et al. (2020)	Suzhou, China	BL	-	-	50,9	55,7	0,08	37,74	24,13	58,22	-	-
LI et al. (2021)	Anhui, China	BL	CFA	-	66,5	20,4	0,033	29,8	26,6	62	-	-
Sahoo et al. (2019)	Carajás, Pará, Brail.	BG	TIF	841,4	141,54	1216,2	-	142,89	43,71	89,13	85,11	582,1

Fonte: Autor, 2025. I2σ – Método da Média Interativa. TIF – Método Tukey. Med+2MAD – método da mediana + 2 \* desvio absoluto mediano. 90° - Método do percentil 90°. CFA – Curva de Frequência acumulada. Distribuição Normal Logarítmica. \*Representa os métodos não abordados nesta pesquisa.

## CONCLUSÃO

A análise das amostras de solo demonstrou a influência de fatores geológicos, litológicos e pedogenéticos na distribuição dos elementos químicos na região de Barcarena. Os resultados evidenciaram que a maioria dos elementos apresentou concentrações mais elevadas na camada mais profunda do solo (40 a 60 cm), sugerindo a retenção desses elementos ao longo do perfil do solo, com causa provável de processos de adsorção, precipitação e dissolução. Elementos como Cd, Cu e Zn, no entanto, apresentaram concentrações mais elevadas na camada superficial (0 a 20 cm), indicando possíveis influências antrópicas na distribuição desses metais. A diversidade das formações geológicas da região, contribuiu para a heterogeneidade geoquímica do solo. Esse contexto foi confirmado pela análise fatorial, que agrupou os elementos em dois fatores principais, indicando a presença de elementos de origem geológica (Al, As, Ba, Cr, Fe e Ni) e de elementos com possível influência antrópica (Cu, Pb e Zn).

A classificação das amostras segundo a Resolução 420 do CONAMA revelou a presença de anormalmente elevados em diferentes profundidades do solo. Na camada superficial (0 a 20 cm), foram identificadas amostras acima dos valores de prevenção (VP) e de intervenção (VI) para elementos como Cu, Hg, Ni, Zn e Cd, com destaque para áreas do lixão municipal e áreas residenciais. Já na camada subsuperficial (40 a 60 cm), observou-se valores acima do esperado para Ba, Cr, Cu, Hg e Pb, novamente com maior incidência no lixão municipal e em algumas áreas agrícolas. Esses resultados indicam que, apesar da baixa influência antrópica geral, algumas áreas específicas podem estar sujeitas a contaminação pontual, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo.

A aplicação de diferentes métodos estatísticos para determinação dos valores de background geoquímico (BG) revelou discrepâncias significativas entre os métodos. O percentil 98º, TIF e Med + 2 MAD apresentaram maior tolerância, enquanto o método  $12\sigma$  foi o mais restritivo, resultando nos menores valores de BL e classificando uma maior proporção de amostras acima do normal para áreas urbanas. O percentil 90º demonstrou ser uma abordagem intermediária, situando-se entre os métodos mais tolerantes e mais rigorosos.

A definição de valores de referência para a qualidade do solo, conforme a legislação ambiental brasileira, permitirá a adoção de medidas mais eficazes na proteção dos solos da região. Assim, a utilização desses métodos permitirá a distinção entre contaminação e variações naturais nos solos da região, fornecendo subsídios para a gestão sustentável do meio ambiente em Barcarena.

## REFERÊNCIAS

- ALBANÊS, S.; CICCHELLA, D.; LIMA, A.; DE VIVO, B. Urban geochemical mapping. In: DE VIVO, B.; BELKIN, H. E.; LIMA, A. (Eds.). *Environmental Geochemistry: Site Characterization, Data Analysis and Case Histories*. Vol. 8. Amsterdam: Elsevier B.V., 2008. p. 153–174.
- ALLEONI, Luís Reynaldo Ferracciú et al. Atributos do solo relacionados à adsorção de cádmio e cobre em solos tropicais. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 27, n. 4, p. 729-737, 2005.
- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. ANDER, E. Louise et al. Methodology for the determination of normal background concentrations of contaminants in English soil. *Science of the Total Environment*, v. 454, p. 604-618, 2013.
- ALVAREZ, V. V. H. et al. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. **Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais-CFSEMG**, 1999.
- AMORIM, Marcelo Andrade et al. Origem e dinâmica da deposição dos sedimentos superficiais na Várzea do Lago Grande de Curuai, Pará, Brasil. *Acta Amazonica*, v. 39, p. 165-171, 2009.
- ANDER, E. Louise et al. Methodology for the determination of normal background concentrations of contaminants in English soil. *Science of the Total Environment*, v. 454, p. 604-618, 2013.
- ANDREAZZA, Robson et al. Biorremediação de áreas contaminadas com cobre. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 36, n. 2, p. 127-136, 2013.
- ANTONIADIS, Vasileios; GOLIA, Evangelia E. Spatial and temporal assessment of cadmium and chromium contamination in soils in the Karditsa region (Central Greece). *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 3820-3827, 2021.
- BEATA, Labaz; CEZARY, Kabala; JAROSLAW, Waroszewski. Ambient geochemical baselines for trace elements in Chernozems—approximation of geochemical soil transformation in an agricultural area. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 191, n. 1, p. 19, 2019.
- BELBÈZE, Stéphane et al. Defining urban soil geochemical backgrounds: A review for application to the French context. *Journal of Geochemical Exploration*, p. 107298, 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107298>>.
- CAMPOS, Milton César Costa. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais Soil attributes and risk of leaching of heavy metals in tropical soils. *Ambiência*, v. 6, n. 3, p. 547-565, 2010.

CARRILLO, Katty Coral et al. Geochemical baseline establishment, contamination level and ecological risk assessment of metals and As in the Limoncocha lagoon sediments, Ecuadorian Amazon region. **Journal of Soils and Sediments**, p. 1-23, 2022.

CHAI, Yongzhen; GUO, Fei. Potentially Toxic Element Contamination in Soils Affected by the Antimony Mine Spill in Northwest China. **Toxics**, v. 11, n. 4, p. 359, 2023.

COLZATO, Marina. **Extração sequencial e cinética de sorção de cádmio em solos tropicais**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo, SP: CETESB, 1999.

CONAMA. **Resolução No 420 de 28 de dezembro de 2009**; Diário Oficial da União: Brasília, Brazil, 2009.

COSTA, Igor Jorge Lobato da et al. Atividade portuária em Barcarena (Pará): Caracterização e análise ambiental de seus efeitos no desenvolvimento local da vila de Itupanema. 2021. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Caracterização e classificação dos solos do Município de Barcarena, Estado do Pará.

CRAVO, M. da S. et al. **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2020.

CUNHA FILHO, F. F.; NETTO, A. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M.; NETO, J. A. S. Metais pesados em amostras de água de irrigação da maior região produtora de hortaliças folhosas de Pernambuco. **Scientia Plena**, v. 10, p. 109908, 2014.

DE FÁTIMA PEREIRA, Simone et al. Estudo químico ambiental do rio Murucupi-Barcarena, PA, Brasil, área impactada pela produção de alumínio. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 2, n. 3, p. 62-82, 2007.

DE MATOS, Gilson Sergio Bastos et al. Soil potentially toxic element contents in an area under different land uses in the Brazilian Amazon. **Heliyon**, v. 9, n. 6, 2023.<<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17108>>.

DE SOUZA SILVA, Leonardo; COSTA, Vânia Maria Torres. Memórias, lutas e identidades das mulheres ‘filhas de Barcarena’. **Amazônica-Revista de Antropologia**, v. 15, n. 1, p. 120-145, 2023.

DOS SANTOS, P. L. et al. **Caracterização e classificação dos solos do Município de Barcarena, Estado do Pará**. 2003.

DOURADO, Gilson Barbosa. Ajuste do modelo aditivo generalizado e identificação de padrão espacial em dados geoquímicos do município de Madre de Deus. 2019.

EPA, U. Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry. **Washington, DC: Environmental Protection Agency**, 1998.

FADIGAS, Francisco de Souza et al. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, v. 61, p. 151-159, 2002.

FERNANDES, Antonio Rodrigues et al. Quality reference values and background concentrations of potentially toxic elements in soils from the Eastern Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 190, p. 453-463, 2018.

FREITAS, Stephanie Jael Negrão de et al. Vulnerabilidade socioambiental relacionada à erosão do solo em Barcarena-PA. 2021.

GALÁN, Emilio et al. A methodological approach for the evaluation of soil pollution by potentially toxic trace elements. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 203, p. 96-107, 2019. <>.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. **Priority List of Hazardous Substances**. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html>>. Acesso em: 24 out. 2024.

GONÇALVES, Deyvison Andrey Medrado et al. Geochemical background for potentially toxic elements in forested soils of the state of Pará, Brazilian Amazon. **Minerals**, v. 12, n. 6, p. 674, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Barcarena. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/barcarena.html>>. Acesso em: 19 fev. 2025.

JESUS, Honório Coutinho de et al. Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da Ilha de Vitória-ES. **Química Nova**, v. 27, p. 378-386, 2004.

LIMA, Hedinaldo Narciso et al. Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos à inundação. **Acta Amazonica**, v. 35, p. 317-330, 2005.

LI, Qi et al. Geochemical baseline establishment and source-oriented ecological risk assessment of heavy metals in lime concretion black soil from a typical agricultural area. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 13, p. 6859, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18136859>.

MADEJON, Paula. Barium. In: **Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. p. 507-514.

MATOS, A. C. S. et al. Bauxite and alumina productive process: socioenvironmental impacts, forms of mitigation and the case of barcarena, Pará, Brazil. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 29644-29654, 2020.

MELLIS, Estevão Vicari. **Adsorção e dessorção de Cd, Cu, Ni e Zn, em solo tratado com lodo de esgoto**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MOREIRA, Amauri da Silva. **Avaliação da Influência da agricultura na presença de metais pesados nas águas do baixo rio Pardo-SP**. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MOURA, Márcio Cleto Soares de et al. Estudo multivariado de solos urbanos da cidade de Teresina. **Química Nova**, v. 29, p. 429-435, 2006.

PINTO, ANITA FERNANDES SOUZA et al. Background concentrations of chemical elements in Sepetiba Bay (SE Brazil). **Journal of Sedimentary Environments**, v. 4, n. 1, p. 108-123, 2019.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2011.

REIMANN, Clemens et al. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. **Applied geochemistry**, v. 88, p. 302-318, 2018.

REIMANN, Clemens; DE CARITAT, Patrice. Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. **Science of the Total Environment**, v. 578, p. 633-648, 2017.

RIEUWERTS, John S. The mobility and bioavailability of trace metals in tropical soils: a review. **Chemical Speciation & Bioavailability**, v. 19, n. 2, p. 75-85, 2007.

RODRIGUES, Aline Sueli de Lima; NALINI JÚNIOR, Hermínio Arias. Geochemical background values and its implications in environmental studies. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, p. 155-165, 2009.

RODRIGUES, Jondison Cardoso; HAZEU, Marcel Theodoor; DO NASCIMENTO, Sabrina Mesquita. COMO SE PRODUZ DESASTRES?: O PROCESSO DE LICENCIAMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DA HYDRO ALUNORTE, EM BARCARENA, PARÁ. **Nucleus (16786602)**, v. 16, n. 2, 2019.

SAHOO, Prafulla Kumar et al. Source and background threshold values of potentially toxic elements in soils by multivariate statistics and GIS-based mapping: a high density sampling survey in the Parauapebas basin, Brazilian Amazon. **Environmental geochemistry and health**, v. 42, n. 1, p. 255-282, 2020.

SALMINEN, Reijo; GREGORAUSKIEN, Virgilija. Considerations regarding the definition of a geochemical baseline of elements in the surficial materials in areas differing in basic geology. **Applied Geochemistry**, v. 15, n. 5, p. 647-653, 2000.

SALOMÃO, Gabriel Negreiros et al. Mapeamento geoquímico e estimativa de background em solos na região da Província Mineral de Carajás – Leste do Cráton Amazônico, Brasil. 2018. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

SÁNCHEZ-DONOSO, Ramón et al. Geochemical characterization and trace-element mobility assessment for metallic mine reclamation in soils affected by mine activities in the Iberian pyrite belt. **Geosciences**, v. 11, n. 6, p. 233, 2021.

SANTOS-FRANCÉS, Fernando et al. Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of heavy metal pollution in soils of the Andes mountain

range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). **International journal of environmental research and public health**, v. 14, n. 8, p. 859, 2017.

SAPPA, Giuseppe; BARBIERI, Maurizio; ANDREI, Francesca. Assessment of trace elements natural enrichment in topsoil by some Italian case studies. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 8, p. 1409, 2020.

SILVA, Rodrigo Ferreira da et al. Comportamento de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong cultivadas em solo contaminado com cobre. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 103-110, 2011.

SILVA, Rodrigo Ferreira da et al. Efeito do cobre sobre o crescimento e qualidade de mudas de *Stryphnodendron polyphyllum* Mart. e *Cassia multijuga* Rich. **Ciência Florestal**, v. 24, p. 717-725, 2014.

SIQUEIRA, Igor Lopes. Disponibilidade de cádmio em solos tratados com resíduos de sisal (*Agave sisalana*). 2023.

SOJKA, Mariusz et al. Causes of variations of trace and rare earth elements concentration in lakes bottom sediments in the Bory Tucholskie National Park, Poland. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 244, 2021.

SOUZA, E.S.; Fernandes, A.R.; Braz, A.M.d.S.; Sabino, L.L.L.; Alleoni, L.R.F. Potentially toxic elements (PTEs) in soils from the surroundings of the Trans-Amazonian Highway, Brazil. *Environ. Monit. Assess.* 2015, 187, 4074. [CrossRef]

USEPA, SW-846 Test Method 3051A: **Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils**, 2007.

USEPA - **United States Environmental Protection Agency, Mercury in Water by Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry**. EPA 821-R-05-001, Office of Water, Washington, D.C, 2005.

USEPA, **Method 6010 D - Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry**. SW-846 Compend, 2014, pp. 561–565.