

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LUCAS JOSÉ SOUZA DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS EM SOLOS
URBANOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE:
BIOACESSIBILIDADE E CORRELAÇÃO COM NDVI**

RECIFE – PE

2024

LUCAS JOSÉ SOUZA DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS EM SOLOS
URBANOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE:
BIOACESSIBILIDADE E CORRELAÇÃO COM NDVI**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Florestal da Universidade Federal
Rural de Pernambuco, como parte
das exigências para a obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia
Florestal.

Orientador: Prof^a Dr^a Caroline
Miranda Bionde

Co-orientador: Dr^o Simone
Aparecida da Silva Lins

RECIFE – PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M527a Mello, Lucas José Souza de
Avaliação da contaminação por metais pesados em solos urbanos da Região Metropolitana do Recife: bioacessibilidade e correlação com NDVI / Lucas José Souza de Mello. - 2024.
28 f. : il.
- Orientadora: Caroline Miranda Bionde.
Coorientadora: Simone Mirtes Araujo Duarte.
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Florestal, Recife, 2024.
1. Metal pesado. 2. Sensoriamento remoto. 3. Qualidade ambiental. 4. Urbanização. I. Bionde, Caroline Miranda, orient. II. Duarte, Simone Mirtes Araujo, coorient. III. Título

CDD 634.9

LUCAS JOSÉ SOUZA DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO POR METAIS PESADOS EM SOLOS
URBANOS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE:
BIOACESSIBILIDADE E CORRELAÇÃO COM NDVI**

BANCA EXAMINADORA

DATA 07/03/2024

Dr^a Simone Mirtes Araújo Duarte
(Departamento de Ciência Florestal/UFRPE)

Dr^o William Ramos da Silva
(Suplente - Departamento de Agronomia/UFRPE)

Prof^a Dr^a Caroline Miranda Bionde
(Orientadora – Departamento de Agronomia/UFRPE)

Dr^o Simone Aparecida da Silva Lins
(Co-orientador – Departamento de Agronomia/UFRPE)

RECIFE-PE

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar, e acima de tudo, a Deus, por sua infinita misericórdia e amor. Sua presença constante em minha vida foi a luz que me guiou durante toda a jornada acadêmica. Agradeço pelas bênçãos derramadas sobre mim, concedendo-me saúde, força e discernimento para superar os desafios e obstáculos que se apresentaram.

A toda minha família, em especial aos meus pais, Luciane e Everaldo, por todo apoio que me deram, não só na jornada acadêmica, mas durante todos os desafios que se apresentaram diante de mim. Pelo amor, cuidado e todos os sonhos que vocês puderam sonhar junto a mim. Agradeço aos meus irmãos Eder, Matheus, Vanessa e Victor, pela confiança e por sempre terem acreditado em mim.

A todas as pessoas que tive a sorte de conhecer durante esses cinco anos de graduação, aos companheiros de sala, os que iniciaram a graduação junto a mim e aos “agregados”, em especial a Eduarda Novais, Andressa Luna, Eduarda Olímpio, Douglas Andrade, Augusto Guilherme, Tainá Werneck e Joseph Soares, pelo companheirismo e suporte nesses anos.

Agradeço a Rayane, meu grande amor, que desde o início da graduação esteve comigo em momentos difíceis, importantes e cruciais. Me auxiliando, guiando e sendo um alicerce para que eu pudesse alcançar meus sonhos, por ter acreditado em mim e dividido tantas conquistas.

Ao Jardim Botânico do Recife que foi um verdadeiro berço de aprendizagem, onde pude dar início a minha jornada e aprendi muito sobre o curso, e sobretudo, sobre a vida. Agradeço a Uiliam Barbosa que foi meu orientador por três anos e a Ladvania que para mim sempre foi um exemplo profissional.

Ao LQAS pela oportunidade de desenvolvimento profissional e por todos os amigos que pude fazer durante o período que estive presente no grupo, em especial a Poliana Santos, Rafael Lima, José Carlos, Taciana Paraizo, Jennifer Nicoli e Daniel Ribeiro, por todos tornarem o trabalho mais fácil com a alegria e companheirismo que só vocês possuem.

Ao CRCN-NE, que mesmo com pouco tempo de passagem, foi importante para ressignificar muitas coisas. Aqui gostaria de agradecer principalmente a André Silva e a Amanda Pessoa, que me abraçaram e me guiaram nesse percurso final da graduação, sendo peças chave para meu desenvolvimento, mostrando que a academia perpassa as instituições.

RESUMO

A poluição urbana por metais pesados é um assunto de grande relevância socioambiental, devido aos potenciais efeitos deletérios a saúde humana e ecológica. O sensoriamento remoto, particularmente o uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), emerge como uma ferramenta promissora para avaliar a saúde da vegetação e possíveis impactos da contaminação do solo. Neste sentido, o presente trabalho buscou avaliar os teores totais e a bioacessibilidade dos metais pesados presentes em solos urbanos da Região Metropolitana do Recife e suas propriedades químicas, obter o NDVI das áreas amostradas e a sua correlação com os teores totais dos metais analisados. A pesquisa foi conduzida na Região Metropolitana do Recife (RMR), onde amostras de solo superficial foram coletadas em áreas urbanas distintas e seus pontos foram georreferenciados. As amostras foram analisadas quanto aos valores de pH, Carbono Orgânico, capacidade de troca de cátions do solo. Os teores totais de metais pesados foram estimados usando Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (pXRF). Os teores dos metais foram comparados com Valores de Referência de Qualidade, além de que ensaios *in vitro* foram realizados para determinar a bioacessibilidade dos metais no solo. Para a estimativa do NDVI foram utilizadas imagens obtidas do satélite CBERS-4^a com resolução espacial de 8m e a partir dos pontos amostrados foram feitos *buffers* com 55, 110 e 220m de raio para demarcação da área a ser analisada. Os resultados revelaram altos teores de metais pesados nas áreas urbanas da RMR que são maiores que os VRQ para o estado de Pernambuco, porém os metais possuem uma baixa bioacessibilidade. Com relação ao tamanho da área analisada, não houve diferença significativa em relação aos valores obtidos. Além disso, observou-se uma correlação negativa entre a maioria dos teores de metais no solo e o NDVI, ou seja, à medida que o NDVI aumenta, os teores dos metais diminuem.

Palavras - chaves: Metal pesado. Sensoriamento remoto. Qualidade ambiental. Urbanização.

ABSTRACT

Urban pollution by heavy metals is a subject of great socio-environmental relevance due to its potential deleterious effects on human and ecological health. Remote sensing, particularly the use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), emerges as a promising tool to assess vegetation health and potential impacts of soil contamination. In this regard, the present study aimed to evaluate the total contents and bioaccessibility of heavy metals in urban soil of the Recife Metropolitan Region and its chemical characteristics, obtain the NDVI of the sampled areas, and correlate it with the total metal contents analyzed. The research was conducted in the Recife Metropolitan Region (RMR), where samples of surface soil were collected in distinct urban areas and their points were georeferenced. The samples were analyzed for pH values, Organic Carbon, Soil Cation Exchange Capacity (CTC), and total heavy metal contents using Energy Dispersive X-ray Fluorescence (pXRF). Metal contents were compared with Quality Reference Values, and *in vitro* assays were performed to determine metal bioaccessibility in the soil. For NDVI estimation, images obtained from the CBERS-4A satellite with 8m spatial resolution were used, and buffers with radii of 55, 110, and 220m were applied to demarcate the area to be analyzed based on the sampled points. The results revealed high levels of heavy metals in urban areas of the RMR, exceeding the Quality Reference Values for the state of Pernambuco, yet the metals exhibit low bioaccessibility. Regarding the size of the analyzed area, there was no significant difference in relation to the values obtained. Additionally, a negative correlation was observed between most soil metal contents and NDVI, meaning that as NDVI increases, metal contents decrease.

Keywords: Heavy metal. Remote sensing. Environmental quality. Urbanization.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Imagens de satélite utilizadas no estudo	14
Tabela 2 - Critério de classificação do índice de geoacumulação (Igeo) dos metais pesados nos solos superficiais (0,0 – 0,2 m) urbanos da Região Metropolitana do Recife	17
Tabela 3 - Interpretação para os valores referentes a correlação de Pearson	17
Tabela 4 - Estatística descritiva das características químicas dos solos superficiais (0,0 - 0,2 m) urbanos da RMR.	18
Tabela 5 - Teores de metais obtidos nos materiais de referência por Fluorescência de Raios X - pXRF	19
Tabela 6 – Estatística descritiva das concentrações dos metais na fração 200 mesh de solos da Região Metropolitana do Recife	19
Tabela 7 – Estatística descritiva dos teores bioacessíveis gástricos dos metais na fração 200 mesh de solos da Região Metropolitana do Recife	21
Tabela 8 – Média dos valores de NDVI para cada raio traçado a partir do local de amostragem	23
Tabela 9 - Matriz de correlação de Pearson entre as características analisadas e os teores dos elementos nos solos superficiais urbanos da Região Metropolitana do Recife	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Locais de amostragem dos solos de vias na Região Metropolitana do Recife	13
Figura 2 - Imagem NDVI com os locais de amostragem	15
Figura 3 - Teores médios dos metais pesados e seus respectivos Valores Orientadores de Qualidade de Pernambuco	20
Figura 4 - Variabilidade do Índice de geoacumulação calculados para os elementos nos solos superficiais urbanos da Região Metropolitana do Recife	21
Figura 5 – Índice de vegetação por diferença normalizada aplicado em diferentes raios a partir do ponto amostrado	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	10
2.1 – Objetivo Geral.....	12
2.2 – Objetivos Específicos	12
3. MATERIAL E METODOS	133
3.1 - Área de estudo, amostragem e preparo das amostras.....	13
3.2 – Cálculo do Índice de Vegetação	14
3.3 – Análises químicas	15
3.3.1 - Determinação dos teores totais dos metais por Fluorescência de Raios X (pXRF).....	15
3.3.2 – Análises das características químicas	15
3.3.3 - Determinação da Bioacessibilidade	16
3.4 - Métodos de avaliação da contaminação do solo	16
3.5 - Análises estatísticas	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 Análises das características químicas	18
4.2 Teores totais dos metais na fração do solo e contaminação	19
4.3 Teores bioacessíveis	21
4.4 Índice de vegetação – NDVI e correlação	22
5. CONCLUSÕES	24

1. INTRODUÇÃO

A poluição e a contaminação do solo, embora frequentemente associadas, apresentam definições distintas. Um solo é considerado contaminado quando apresenta teores de um elemento ou substância superiores aos valores naturais, mesmo que não haja danos aos organismos expostos. Já um solo poluído, além de apresentar teores superiores aos naturais, possui elementos ou substâncias que causam danos aos organismos vivos, como a saúde humana, animal ou vegetal (Pierzynski et al., 2005).

A contaminação ambiental por metais pesados é um problema de grande importância em vários países do mundo, influenciando diretamente a saúde humana (Tepanosyan et al., 2018; Adimalla et al., 2020; Zheng et al., 2020). Estudos mostram que seres humanos expostos a elevadas concentrações de metais sofrem danos no sistema nervoso central, quando estes elementos se acumulam nos tecidos gordurosos do corpo humano, ou podem ter distúrbios no funcionamento de órgãos internos, quando estes metais se mantêm no sistema circulatório (Nriagu, 1988; Thompson et al., 1988; Waisberg et al., 2003; Bocca et al., 2004). Além disso, metais pesados como As, Cd, Cr e Ni são classificados como carcinogênicos (USEPA, 2002a).

Os solos dos grandes centros urbanos desempenham papel importante na qualidade de vida dos habitantes. Portanto, solos urbanos contaminados por metais pesados representam um risco à saúde dos residentes das metrópoles (Lee et al., 2006; Acosta et al., 2009; Guney et al., 2010; Mostert et al., 2012). Os teores de metais pesados nos solos podem variar naturalmente devido ao fato de que compreendem parte dos elementos acessórios na constituição das rochas, no entanto, os teores mais elevados são encontrados em solos onde há atividades humanas, como atividades industriais e agrícolas como produção de energia, construção civil, deposição de resíduos industriais e urbanos e emissão veicular e industrial são as principais fontes responsáveis pelo crescente aporte de metais no ambiente urbano (Li et al., 2001; Adachi & Tainosho, 2005; Ljung et al., 2006; Lee et a., 2006; Govil et al., 2008; Bionde, 2010).

A relevância das diferentes formas de exposição a metais pesados em solos contaminados pode ser avaliada por meio da avaliação de risco, que estima os potenciais efeitos sobre a saúde. A exposição a metais pesados é um sério problema de saúde pública que pode causar diversos problemas, como danos ao sistema nervoso central, rins, fígado, sistema cardiovascular, sistema reprodutivo e câncer (Fernandes, 2022). A avaliação de

risco é um procedimento dividido em várias fases, composta inicialmente pela avaliação da forma de exposição com posterior análise do efeito toxicológico promovido pelo contaminante, se cancerígeno ou não, e, por fim, pela definição da caracterização do risco (USEPA, 1989; USDOE, 2011).

A bioacessibilidade é a capacidade de um metal pesado ser absorvido pelo organismo. Ela é influenciada por uma série de fatores, incluindo a forma química do metal, as propriedades do meio ambiente e as características do organismo. Os metais pesados são mais bioacessíveis quando estão na forma iônica. Isso ocorre porque os íons são mais solúveis e, portanto, mais facilmente absorvidos pelo organismo. (Barbosa, 2023).

As propriedades do meio ambiente influenciam a bioacessibilidade dos metais pesados, como o pH do solo, a presença de matéria orgânica e a atividade biológica (Fernandes et al., 2018, Silva et al., 2022). As características do organismo também podem influenciar a bioacessibilidade dos metais pesados. Por exemplo, crianças e idosos são mais suscetíveis à exposição a metais pesados do que adultos saudáveis.

Uma alternativa viável para o monitoramento ambiental é a técnica do sensoriamento remoto que permite a aquisição de informações sobre a superfície terrestre a partir de imagens registradas por sensores remotos, como satélites, aviões e drones, permitindo a coleta de dados de grandes áreas de forma rápida e eficiente (Cunha et. al., 2018, Pires & Oliveira, 2021). Essas imagens também podem ser usadas para uma variedade de aplicações, incluindo planejamento urbano e gestão de recursos naturais. Com o sensoriamento remoto é possível obter alguns índices de vegetação, onde o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) se destaca como um aliado em estimar a saúde e densidade da vegetação.

O índice de vegetação funciona como uma lupa digital, permitindo analisar as características da vegetação a partir de dados espectrais. Essa técnica se baseia na refletância da luz em comprimentos de onda específicos: enquanto a parte vermelha do espectro é prontamente absorvida pela clorofila das folhas saudáveis, as ondas infravermelhas próximas tendem a ser refletidas (Huete & van Leeuwen, 2002). O NDVI então traduz a relação entre o vermelho e o infravermelho em um valor numérico, com áreas de vegetação vigorosa apresentando valores mais altos e solos ou vegetação estressada, valores mais baixos (Cunha et. al., 2018, Pires et. al, 2021, Silva & Ferreira, 2022).

Na preservação ambiental, o índice se torna uma sentinela contra o desmatamento, mapeando a cobertura vegetal e detectando mudanças ao longo do tempo. Ademais, estudos de biodiversidade e monitoramento de zonas áridas também se beneficiam do NDVI, oferecendo *insights* estimados sobre a dinâmica e distribuição das comunidades vegetais.

2. OBJETIVOS

2.1 – Objetivo Geral

Avaliar o nível da contaminação por metais pesados (As, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn) nos solos superficiais de vias urbanas da Região Metropolitana do Recife (RMR), além de realizar a avaliação da bioacessibilidade *in vitro* nos solos e comparar os teores totais dos metais com o NDVI.

2.2 – Objetivos Específicos

2.2.1 - Determinar as concentrações totais de As, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn nas amostras dos solos superficiais de vias urbanas;

2.2.2 - Analisar as características químicas (e.g. pH, carbono orgânico, capacidade de troca catiônica) que podem se correlacionar com os valores bioacessíveis;

2.2.3 - Avaliar o nível da poluição dos solos superficiais de vias urbanas por meio de cálculos do índice de geoacumulação;

2.2.4 - Obter os valores de NDVI dos locais amostrados e comparar com os teores totais dos metais pesados;

2.2.5 - Avaliar o NDVI como potencial variável que pode prever o acúmulo dos metais pesados no solo.

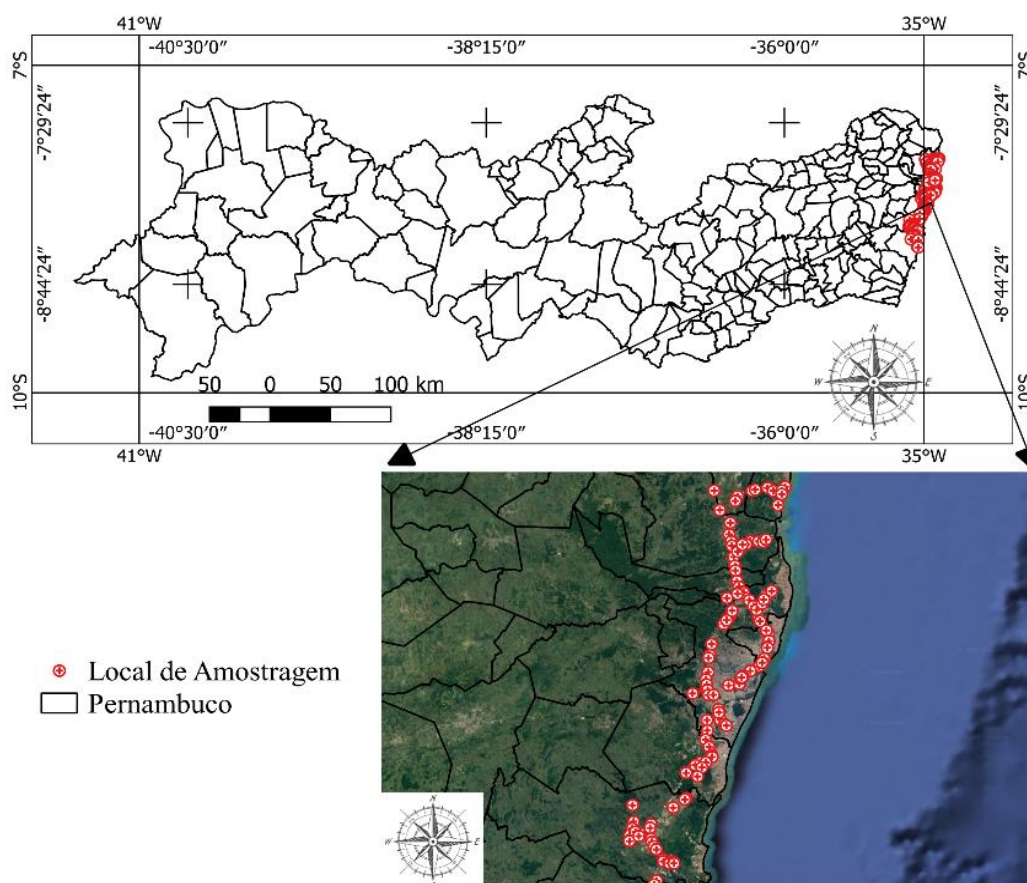
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Área de estudo, amostragem e preparo das amostras

O estudo foi realizado na região metropolitana do Recife (RMR). O maior aglomerado urbano – industrial da região Norte – Nordeste do Brasil, com 4,05 milhões de habitantes (IBGE, 2011). O clima da região é do tipo tropical úmido, com precipitação e temperatura média anual de 2200 mm e 25,5°C, respectivamente; o relevo varia de planícies litorâneas a ondulado; e a direção predominante do vento é do norte-nordeste (NNE) para o sul-sudoeste (SSW) (IBGE 2018; INMET 2018).

Toda a extensão territorial urbana da RMR foi dividida em estratos com dimensões de 4,0 km² (2,0 km x 2,0 km). Em cada estrato foram coletadas duas amostras compostas de solo superficial na profundidade de 0,0 – 0,2 m com trado de aço inoxidável. Os pontos de coleta foram georreferenciados com GPS modelo Garmin eTrex 10.0, totalizando 122 pontos amostrados.

Figura 2 - Locais de amostragem dos solos de vias na Região Metropolitana do Recife



Fonte: o autor

As amostras foram armazenadas em potes plásticos herméticos de polietileno; levadas ao laboratório; colocadas para secar a temperatura ambiente; e peneiradas em malha de abertura de 2,0 mm. Sub-amostras foram obtidas por meio de agitador de peneiras para obtenção de material mais fino (200 mesh) para a leitura de teores de metais pesados e bioacessibilidade, com objetivo de selecionar o material que se assemelha a “poeira” e pode ser inalado ou ingerido.

3.2 – Cálculo do Índice de Vegetação

A partir do NDVI é possível quantificar a densidade da vegetação a partir da fitomassa foliar fotossinteticamente ativa pela unidade da área (variando entre -1 e 1, quanto maior o índice, mais densa é a vegetação)

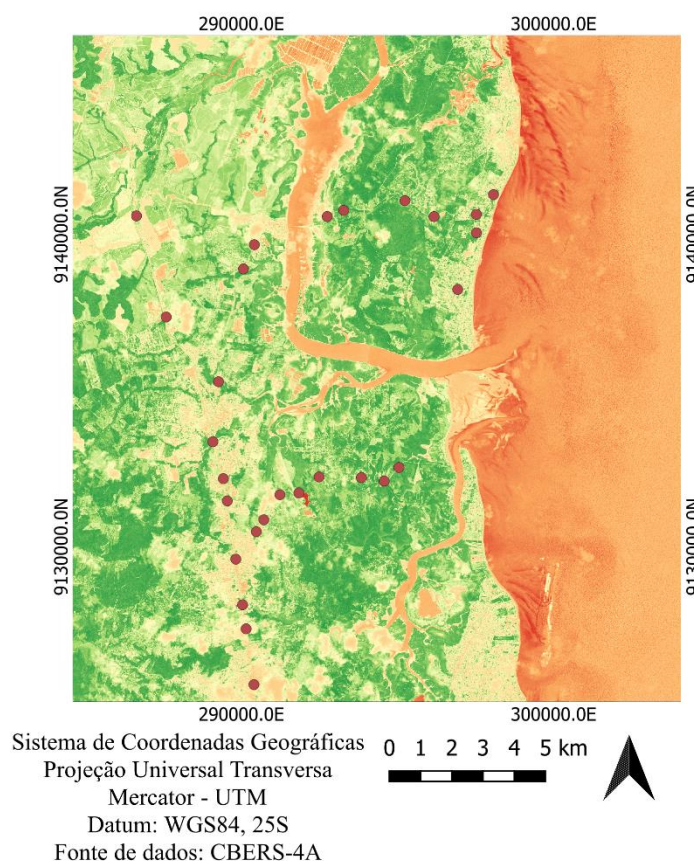
Para a elaboração dos mapas do NDVI, assim como a obtenção dos valores, foram utilizadas imagens do satélite CBERS-4A (China-Brazil Earth Resources Satellite) conforme visto na *Tabela 1*. Além disso, o processamento digital das imagens se deu pela utilização do software livre Qgis versão 3.34.1 Prizren. Para cada ponto amostrado foram criados *buffers* com 55, 110 e 220m de raio.

Tabela 1 - Imagens de Satélite utilizadas no estudo

Imagem	Satélite	Banda espectral	Resolução
CBERS_4A_WPM_20230107_192_123_L4		0,63 - 0,69 μm	
	CBERS-4A		8m
CBERS_4A_WPM_20230107_192_123_L4		0,77 - 0,89 μm	

A utilização do NDVI ocorre pela diferença entre as bandas do infravermelho próximo (*NIR*) e a banda vermelho (*RED*), dividido pelo somatório destas. Segundo a fórmula abaixo, descrita por Rouse et al, em 1973:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Figura 2 – Imagem NDVI com alguns pontos amostrados

Fonte: o autor

3.3 – Análises químicas

3.3.1 - Determinação dos teores totais dos metais por Fluorescência de Raios X (pXRF)

Todas as análises foram feitas no Laboratório de Química ambiental de Solos (LQAS) na Universidade Federal Rural de Pernambuco. Para a determinação dos teores totais dos metais por pXRF, foi utilizado um equipamento de Bruker S1 Titan 800. Amostras com granulometria de 200 mesh, foram acondicionadas em copos de amostras e utilizadas diretamente para medição. Foi selecionada a aplicação Soil, com método padrão realizado com materiais de referência (Brucker). As leituras foram realizadas por 300 segundos com seguindo as recomendações do método USEPA 6200 (2007) para esse tipo de mensuração.

3.3.2 – Análises das características químicas

Nas amostras de terra fina seca ao ar (TFSA), a determinação do pH foi realizada em água na relação de 1:2,5 (v/v); o carbono orgânico total foi determinado pelo método

de oxidação via-úmida Walkley-Black (Teixeira, 2017); a capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinado pelo método do acetato de sódio/amônio (McGeorge, 1954).

3.3.3 - Determinação da Bioacessibilidade

Para a os teores bioacessíveis dos metais no solo, foram simuladas condições do trato gástrico digestivo, utilizando o método de extração *in vitro* proposto por Drexler and Brattin (2007), onde adicionados 25 mL da solução de 0,4 M de Glicina (pH 1,5 HCl) a 0,5 g de solo (fração 200 mesh). A mistura foi rotacionada a 30 rpm por 1 h a 37°C. O extrato foi separado em centrífuga, o sobrenadante filtrado e armazenado para análise. As determinações dos teores dos metais nos extratos foram realizadas por Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP – OES Perkin Elmer Optima 7000 DV, Shelton, USA).

A fração bioacessível (bioacessibilidade) do elemento (FBM) foi calculada por:

$$FBM_{\%} = \frac{M_{bio}}{M_t} \times 100$$

onde:

$FBM_{\%}$ – Percentual da fração bioacessível do elemento;

M_{bio} – Fração solúvel no fluido estomacal;

M_t – Concentração total do elemento no solo.

3.4 - Métodos de avaliação da contaminação do solo

O I_{geo} é uma ferramenta geoquímica útil para avaliação da contaminação, inicialmente proposto por Müller (1969), Silva (2008) define como um indicador de poluição ocasionado por elementos metálicos, o I_{geo} foi calculado pela expressão:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i (mg\ kg^{-1})}{1,5 \times VRQ (mg\ kg^{-1})} \right]$$

Onde, VRQ é o Valor de Referência de Qualidade, disposto na Instrução Normativa nº7 de 07/07/2014 da CPRH.

Tabela 2. Critério de classificação do índice de geoacumulação (I_{geo}) dos metais pesados nos solos superficiais (0,0 – 0,2 m) urbanos da Região Metropolitana do Recife

I _{geo}	Qualidade Ambiental ^c
< 1	Não poluído
1 a 2	Pouco poluído
2 a 3	Levemente poluído
3 a 4	Moderadamente poluído
4 a 5	Altamente poluído
> 5	Poluição muito alta

^cMuller (1969)

3.5 - Análises estatísticas

Os valores da média e do desvio padrão foram calculados para todas as variáveis analisadas. Todos os resultados dos tratamentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA $p < 0.05$). Os valores médios dos resultados do NDVI foram comparados entre os três tamanhos de raio de cada buffer pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). A correlação de Pearson, também conhecida como coeficiente de correlação linear de Pearson, é uma medida estatística que quantifica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis contínuas, sua interpretação está descrita na *Tabela 3*. O valor da correlação de Pearson varia entre -1 e 1.

Tabela 3 – Interpretação para os valores referentes a correlação de Pearson.

Valores de r (+/-)	Interpretação
0,00	Ausência de correlação
0,01 a 0,19	Correlação muito fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 0,99	Correlação muito forte
1,00	Correlação perfeita

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises das características químicas

Para os valores de pH dos solos nos 122 pontos amostrados foi possível observar uma variação que vai de uma condição de extremamente ácido (pH 2,86) a alcalino (pH 8,02). Mas de forma geral o pH dos solos foram próximos a 5,85, demonstrando uma tendência a neutralidade. Os solos apresentaram baixos teores de carbono orgânico (C.O) do solo (em média $1,12 \text{ g kg}^{-1}$), a baixa CTC (Capacidade de Troca Catiônica) em solos de vias urbanas pode ser atribuída a diversos fatores. (Tabela 2).

Tabela 4 - Estatística descritiva das características químicas dos solos superficiais (0,0 - 0,2 m) urbanos da RMR.

Variáveis	Unidades	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	DP	CV%
pH	<i>adimensional</i>	2,86	8,02	5,88	5,85	1,15094	19,65
COS	g kg^{-1}	0,08	2,25	1,08	1,12	0,41215	36,68
CTC	cmolc kg^{-1}	3,11	18,83	7,51	7,79	2,44	31,34

Em ambientes urbanos, a presença de poluentes provenientes de fontes como veículos automotores, indústrias e construções pode contribuir para a redução da CTC do solo. Conforme indica Smith et al. (2017). Além disso, a urbanização também pode resultar na compactação do solo devido ao tráfego constante de veículos e pedestres. Segundo Lal et al. (2015), a compactação do solo pode resultar em uma redução da porosidade, o que diminui a capacidade de retenção de água e nutrientes, afetando diretamente a CTC.

A atividade humana também pode contribuir para a redução do C.O. nos solos urbanos. Por exemplo, o tráfego constante de veículos e a compactação do solo associada a áreas urbanas densamente povoadas podem resultar na degradação física do solo e na redução da porosidade, o que limita a penetração de raízes e a decomposição de resíduos orgânicos (Lal et al., 2015). Além disso, a contaminação do solo por poluentes provenientes de atividades urbanas, como metais pesados e produtos químicos, pode inibir a atividade microbiana responsável pela decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, reduzir a quantidade de C.O. no solo (Kibblewhite et al., 2016).

4.2 Teores totais dos metais na fração do solo e contaminação

Na *Tabela 5* estão dispostos os dados de recuperação dos materiais de referência (NIST 2709a e 2710a). Altas recuperações foram obtidas para os metais analisados, apenas o Ba apresentou menor recuperação.

Tabela 5 - Teores de metais obtidos nos materiais de referência por Fluorescência de Raios X - pXRF

Elemento	Valor certificado (mg kg ⁻¹)		Valor obtido (mg kg ⁻¹)		Recuperação (%)	
	NIST 2709a	NIST 2710 ^a	NIST 2709a	NIST 2710a	NIST	NIST
					2709a	2710a
As	10,5	1540	12	1591	114	103
Ba	979	792	748	595	76	75
Cr	130	23	126	28	97	122
Cu	33,9	3420	32	3487	94	102
Mn	529	2140	549	1969	104	92
Ni	85	8	84	<LD	99	-
Pb	17,3	5520	15	5503	87	100
V	110	82	130	97	118	118
Zn	103	4180	106	4780	103	114

<LD: Menor que o limite de detecção

Já na *Tabela 6*, são apresentados os resultados para as amostras analisadas de vias urbanas da região metropolitana. Vale ressaltar que a emissão veicular é uma das principais fontes de poluição nas cidades, impactando negativamente a saúde humana e o meio ambiente. Entre os poluentes emitidos pelos veículos automotores, os metais pesados despertam grande preocupação devido à sua toxicidade e persistência no ambiente.

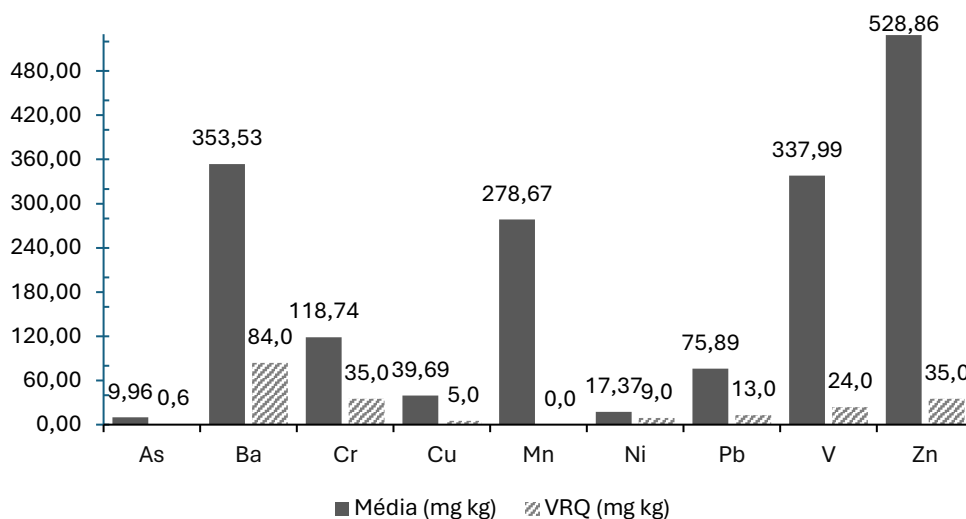
Tabela 6 – Estatística descritiva das concentrações dos metais na fração 200 mesh de solos da Região Metropolitana do Recife.

Elemento	Mínimo (mg kg ⁻¹)	Máximo (mg kg ⁻¹)	Média (mg kg ⁻¹)	Mediana (mg kg ⁻¹)	Desv Pad (mg kg ⁻¹)	CV (%)
As	3,00	30,00	9,96	9,00	3,72	37,00
Ba	60,00	1708,00	353,53	343,00	263,51	75,00
Cr	18,00	250,00	118,74	114,00	48,62	41,00
Cu	93,69	5225,00	39,69	43,00	433,39	473,00
Mn	42,00	1233,00	278,67	211,00	185,37	67,00
Ni	4,00	78,00	17,37	16,00	10,11	58,00
Pb	8,00	1623,00	75,89	52,00	143,42	189,00
V	130,00	1297,00	337,99	325,00	134,01	40,00
Zn	33,00	38000,00	528,86	157,00	3236,77	612,00

Desv Pad: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação

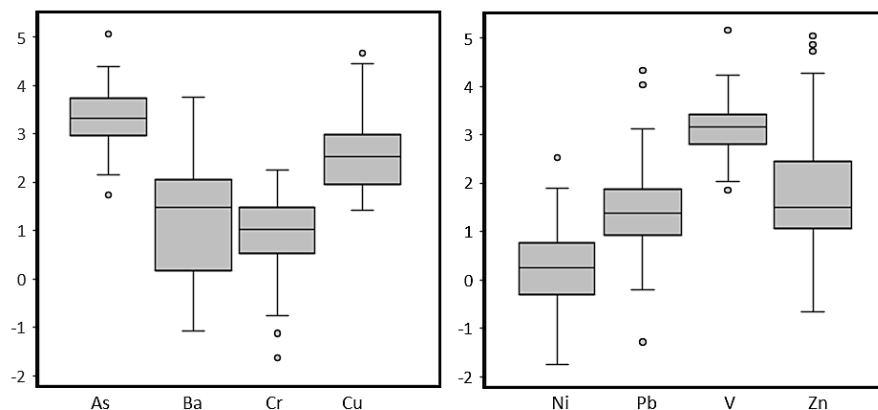
Os teores médios (*Tabela 6*) para As, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn na fração do solo foram (mg kg^{-1}): 9,96; 353,53; 118,74; 93,69; 278,67; 17,37; 75,89; 337,99 e 528,86, respectivamente. Os altos coeficientes de variação (37% a 612%) podem explicar que os dados foram afetados por diferentes características das vias. Diversos estudos relataram que as concentrações de alguns metais, como Pb, Cu, Ni e Zn estão diretamente ligados com a emissão veicular, associado ao volume de tráfego (Zhang et. al., 2020, Wang et. al., 2021, Pinto et. al., 2022) Os teores dos metais encontrados foram superiores ao VRQ de cada metal no estado de Pernambuco (*Figura 3*).

Figura 3 - Teores médios dos metais pesados e seus respectivos Valores Orientadores de Qualidade de Pernambuco.



Com isso, foi possível calcular os valores referentes ao I_{geo} . Baseado nos resultados, conforme visto na *Figura 4*, os elementos Cr e Ni apresentaram valores inferiores a 1, sendo classificados como “não poluído”, no entanto Cr (0,96) apresentou o índice muito próximo de ser classificado como “pouco poluído”, já os metais Ba (1,16), Pb (1,46) e Zn (1,78) foram classificados como “pouco poluído”, enquanto Cu (2,66) foi classificado como “levemente poluído”. Por fim, classificados como “moderadamente poluído” estão os elementos As (3,34) e V (3,12), o que revela que em média, as áreas amostradas possuem um nível de poluição.

Figura 4 - Variabilidade do Índice de geoacumulação calculados para os elementos nos solos superficiais urbanos da Região Metropolitana do Recife.



4.3 Teores bioaccessíveis

Os teores médios bioaccessíveis gástricos (mg kg^{-1}) (*Tabela 7*) mais elevados foram para Zn (91,10), Mn (50,95), Ba (43,94), Cu (42,93) e Pb (27,36) e os mais baixos foram: As (0,26), Cr (1,15), Ni (1,61) e V(2,60). No entanto, de forma geral os metais apresentaram baixa bioacessibilidade, Zn (28,23%) > Cu (21,56%) > Pb (18,29%) > Mn (18,05%) > Ba (16,80%) > Ni (8,68%) > As (2,60%) > Cr (1,04%) > V (0,96%).

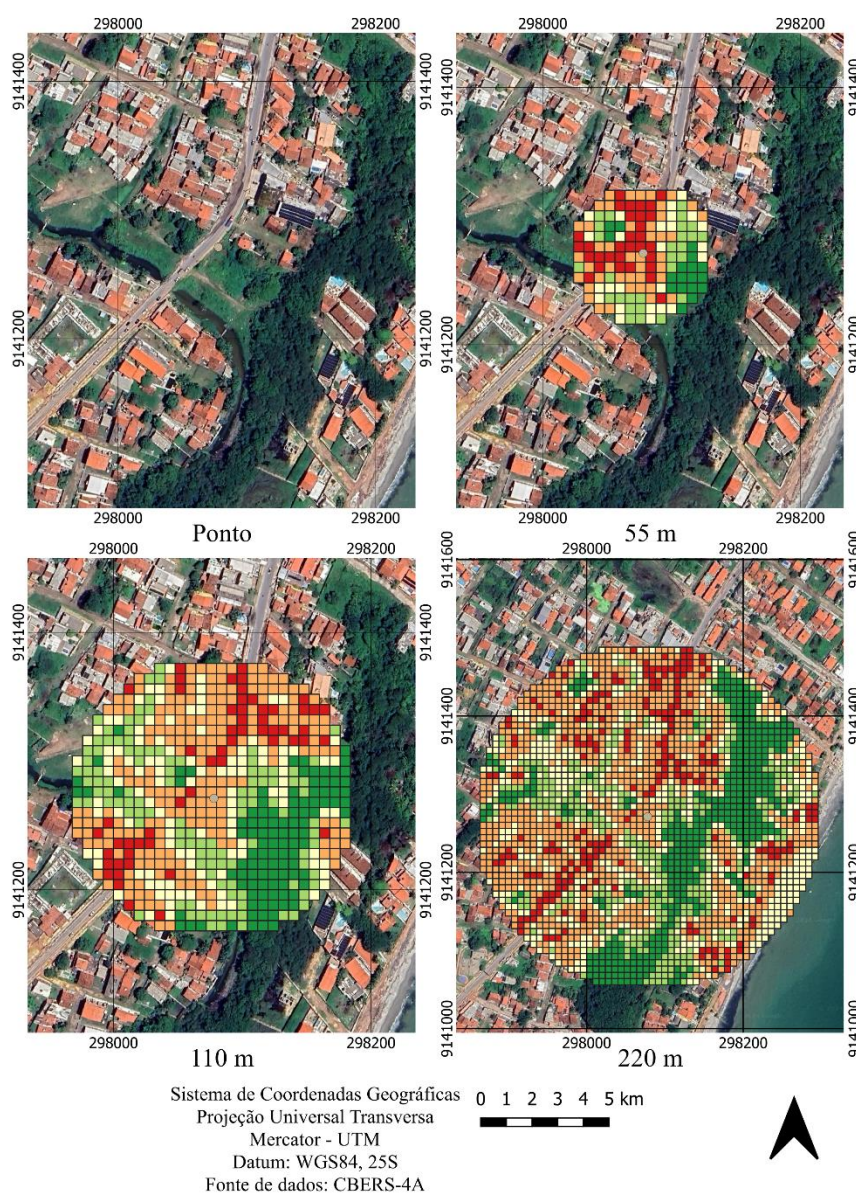
Tabela 7 – Estatística descritiva dos teores bioaccessíveis gástricos dos metais na fração 200 mesh de solos da Região Metropolitana do Recife.

Elemento	Mínimo (mg kg^{-1})	Máximo (mg kg^{-1})	Média (mg kg^{-1})	Mediana (mg kg^{-1})	Desv Pad (mg kg^{-1})	CV (%)
As	0,00	1,60	0,26	0,25	0,25	96
Ba	2,60	175,28	43,94	30,11	38,2	87
Cr	0,00	5,55	1,15	0,95	0,86	75
Cu	0,02	2719,27	42,93	8,29	268,31	625
Mn	3,43	306,10	50,95	27,31	55,10	108
Ni	0,00	20,02	1,61	0,92	2,310	143
Pb	0,55	992,50	27,36	6,28	103,71	379
V	0,27	14,92	2,60	2,12	1,94	75
Zn	4,62	663,77	91,10	46,84	121,39	133

4.4 Índice de vegetação – NDVI e correlação

Os resultados de NDVI das áreas amostradas variaram significativamente ($CV = 70\%$), variando de $-0,02$ até $0,63$, isso se deu pela heterogeneidade da amostragem, no entanto, a média dos resultados foi de $0,20$, vale ressaltar que o índice varia entre -1 e 1 , onde áreas com valores próximos a 1 são compostas por áreas de vegetação densa (Tucker, 1979).

Figura 5 – Índice de vegetação por diferença normalizada aplicado em diferentes raios a partir do ponto amostrado



Fonte: o autor

Com relação aos diferentes raios a partir do ponto amostrado, não foi encontrada diferença significativa ao nível de significância de 5% para o resultado do NDVI. Com isso foram adotados os resultados para o NDVI cujo raio foi de 55m.

Tabela 8 – Média dos valores de NDVI para cada raio traçado a partir do local de amostragem

Raio (m)	NDVI
55	0,206 ^a
110	0,229 ^a
220	0,246 ^a

Diversos estudos relatam a relação do processo de urbanização e a densidade da cobertura vegetal (Oliveira et. al., 2023; Wang et. al. 2016; Silva et. al 2020). A maioria dos metais possuem uma correlação negativa muito fraca, mas que expressa a diminuição do metal pesado à medida que o NDVI aumenta, exceto para V que teve uma correlação positiva muito fraca. A classificação da correlação como muito fraca pode estar ligada ao local de amostragem, visto que são áreas urbanas com pouca urbanização, fazendo com que os valores para o NDVI fossem, em sua maioria, baixos, porém, ainda assim, foi possível observar uma correlação entre os teores de metais pesados e o NDVI. Os valores de pH do solo se relacionaram positivamente com os teores de As, Cr, Cu, Ni, Pb, V e Zn, enquanto Ba e Mn apresentaram uma correlação negativa.

Tabela 9 - Matriz de correlação de Pearson entre as características analisadas e os teores dos elementos nos solos superficiais urbanos da Região Metropolitana do Recife

	NDVI	pH	CO(g kg)	CTC
As	-0,17362	0,155383	0,066783	-0,0185
Ba	-0,08932	-0,08132	-0,13832	0,001794
Cr	-0,10095	0,102533	0,060192	-0,1082
Cu	0,047427	0,078551	0,101457	-0,0602
Mn	-0,00155	-0,00882	-0,04086	0,106839
Ni	-0,03398	0,166699	0,013173	0,054086
Pb	-0,02086	0,09838	0,12948	-0,07118
V	0,035189	0,122451	-0,17	0,056978
Zn	-0,10002	0,031086	-0,01118	0,035777

5. CONCLUSÕES

Os solos urbanos analisados apresentaram uma tendência a uma característica neutra e uma baixa capacidade de retenção de cátions fazendo com que esses solos sejam mais suscetíveis à erosão, pois os cátions ajudam a manter as partículas do solo agregadas.

As concentrações médias encontradas para os elementos estudados para os solos da RMR apresentaram teores superiores aos teores encontrados nos Valores de Referência de Qualidade do estado de Pernambuco (VRQ), apresentando uma contaminação por múltiplos metais pesados (As, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn) de grande relevância para a saúde humana. Além de que as concentrações altas no solo nem sempre implicam em maior fração bioacessível. Os metais apresentaram baixa bioacessibilidade.

Com relação ao NDVI, foi possível encontrar uma correlação com os teores de metais pesados, mesmo que fraca, sugere que a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto podem ser importantes auxiliadoras no monitoramento de áreas degradadas e que estão diretamente ligadas com impacto da urbanização.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, J.A.; FAZ CANO, A.; AROCENA, J. M.; DEBELA, F.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S. Distribution of metals in soil particle size fraction and its implication to risk assessment of playgrounds in Murcia city (Spain). 149: 101-109, 2009.
- ADASHI, K., TAINOSHO, Y. Single characterization of size-fractionated road sediments. **Applied Geochemistry**, 20: 849-859, 2005.
- ADIMALLA, N.; CHEN, J.; QIAN, H. Spatial characteristics of heavy metal contamination and potential human health risk assessment of urban soils: A case study from an urban region of South India. **Ecotoxicology and environmental safety**, 194, 110406, 2020.
- Barbosa, P. C. (2023). Bioacessibilidade de metais pesados: uma revisão bibliográfica. **Revista de Saúde Pública**, 57(3), 1-12. 2023.
- BIONDI, C. M. Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do estado de Pernambuco. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, **Universidade Federal Rural de Pernambuco**, 58p. 2010.
- bocca, B.; Alimonti, A.; PETRUCCI, F.; VIOLANTE, N.; SANCESARIO, G.; FORTE, G. Quantification of trace elements by sector field inductively couple plasma spectrometry in urine, serum, blood and cerebrospinal fluid of patients with Parkinson's disease. **Spectrochim Acta**, 59: 599-665, 2004.
- Cunha, J. E. B. L., de Oliveira, E. S., de Sousa, A. C., & de Sousa, M. G. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22(3), 334-342. 2018
- Fernandes, A. C., Oliveira, A. C., & Souza, A. P. . Bioacessibilidade de metais pesados em solos contaminados: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22(1), 79-86. 2018

Fernandes, J. A. . Risco de exposição a metais pesados: uma revisão bibliográfica. **Revista de Saúde Pública**, 56(3), 1-12. 2022

Govil, P., Sorlie, J., Murthy, N., Sujatha, D., Reddy, G., Rudolph-Lund, K., Krishna, A., Rama Mohan, K. Soil contamination of heavy metal in the Katedan Industrial Development Area, Hiderabad, **India**. **Environment Monit. Assessment**, 140: 313-323, 2008.

Guney, M., Zagury, G. J., Dogan, N., Onay, T. T. Exposure assessment and risk characterization from trace elements following soil ingestion by children exposed to playgrounds, parks and picnic areas. **Journal of Hazardous Materials**, 182: 656-664, 2010.

Huete, A. R., Didan, K., & van Leeuwen, W. J. A review of vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201. 2002

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2011. Disponível em:<www.ibge.gov.br>Acessado em: 9 dezembro 2023.

Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. Soil health in agricultural systems. CRC Press. 2016

Lal, R., Mbagwu, J. S. C., & Amalu, U. C. . Soil structure and its role in ecosystem function and environmental quality. In *Soil Physical Conditions and Crop Production* (pp. 163-187). CRC Press. 2015

Lee, C. S., Li, X. D., Shi, W. Z., Cheung, S. C., Thornton, I. Metal contamination in urban, suburban, and country parks soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistic. **Science of the total environment**, 356: 45-61, 2006.

Li, H. B., Yu, S., Li, G. L., Deng, H., Luo, X. S. Contamination and source differentiation of Pb in parks soils along na urban-rural gradient in Shanghai. **Environment Pollution**, 159: 3536-3544, 2011.

Ljung, K., Selinus, O., Otabbong, E. Metals in soils of children's urban environments in the small northern european city of uppsala. **The science of the total environment**, 366: 749-759, 2006.

Nriagu, J. O. A silent epidemic of environmental metal poisoning? **Environmental Pollution**, 50: 139-161, 1988.

Oliveira, F. R. P; Scaramuzza, C. A. M; Manzione, M. J. S; Oliveira, E. A; Silva. M. S. O; Sorrentino, M; Rodrigues, J. R; Tundisi, J. G. Impactos da expansão urbana sobre a cobertura vegetal nativa no município de São José dos Campos, SP. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 75, n. 4, p. 1-17, 2023.

Pierzynski, G. M.; Sims, J. T.; Vance, G. F. Soil and environmental quality. 3rd ed. **Boca Raton: CRC: Taylor and Francis**. 569 p. 2005.

Pinto, E. G., Silva, L. F. O., & Oliveira, A. P. Avaliação da concentração de metais pesados em vias de diferentes áreas de tráfego em Belo Horizonte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 27(1), e20210248. 2022

Pires, F. O., & Oliveira, A. M. Aplicações do sensoriamento remoto no monitoramento ambiental. **Revista Brasileira de Cartografia**, 73(2), 267-283. 2021

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1973) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt, 10-14 December, SP-351, 309-317.

Silva, I. M. Comparação dos índices de qualidade da água e usos do fator de contaminação e índice de geoacumulação para os sedimentos da microbacia do Arroio João Corrêa, São Leopoldo, RS, Brasil. 2008. 220 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2008

Silva, L. R., Oliveira, R. C., & Souza, M. G. . Bioacessibilidade de metais pesados em solos contaminados: uma revisão bibliográfica. **Revista de Ciências Ambientais**, 10(2), 1-22. 2022

Schimidt, C. W. Lead in air adjusting to a new standard. *Environment Health Perspect*, 118: 76-79, 2010.

Tepanosyan, Gevorg et al. Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health. **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 900-909, 2018.

Thompson, C. M.; Markesbery, W. R.; Ehmann, W. D.; Mao, Y. X.; VANCE, D. E. Regional brain trace-element studies in Alzheimer's disease, **Neurotoxicity**, 9: 1-7, 1988.

USDOE – United State Department Energy’s Oak Ridge Operations Office. Risk assessment information system (RAIS). US Department Energy’s Oak Ridge Operations Office, 2011.

USEPA – United State Environmental Protection Agency. Method 3051a – Microwave assisted acid digestion of sediments, sluges, soils, and oils. Revision 1 Feb 2007. 30 p. 1998.

USEPA - United State Environmental Protection Agency. Child-specific exposure factors handbook. EPA-600-P-00-002B. **National center for environmental assessment.** 2002a.

Waisberg, M.; Joseph, P.; Hale, B.; Beyersman, D. Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. **Toxicology**, 192: 95-117, 2003.

Wang, Y., Huang, Y., Wang, H., Chen, Y., & Liu, X. Impact of traffic-related emissions on heavy metal contents in roadside soil and dust in Beijing, China. **Science of the Total Environment**, 758, 143718. 2021.

Zhang, Y., Liu, X., Wang, Y., & Huang, Y. Spatial distribution and source identification of heavy metals in urban road dust of Shanghai, China. **Environmental Science and Pollution Research**, 27(14), 17871-17883. 2020.

Zheng, Shunan et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil and food crops in the Pearl River Delta urban agglomeration of China. **Food chemistry**, v. 316, p. 126213, 2020.