

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALINE RODRIGUES

**CONCENTRAÇÃO DE METAIS POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA
COM PLASMA INDUZIDO EM SOLO DE CULTIVO ORGÂNICO PRÓXIMO À
RODOVIA PR-566, EM FRANCISCO BELTRÃO - PR**

FRANCISCO BELTRÃO

2025

ALINE RODRIGUES

**CONCENTRAÇÃO DE METAIS POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA
COM PLASMA INDUZIDO EM SOLO DE CULTIVO ORGÂNICO PRÓXIMO À
RODOVIA PR-566, EM FRANCISCO BELTRÃO – PR**

**Concentration of Metals by Inductively Coupled Plasma Optical Emission
Spectrometry in Organic Farming Soil Near PR-566 Highway, Francisco
Beltrão, Paraná, Brazil**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador (a): Prof. Dr. Davi Zacarias de Souza.

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALINE RODRIGUES

**CONCENTRAÇÃO DE METAIS POR ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA
COM PLASMA INDUZIDO EM SOLO DE CULTIVO ORGÂNICO PRÓXIMO À
RODOVIA PR-566, EM FRANCISCO BELTRÃO – PR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador (a): Prof. Dr. Davi Zacarias de Souza.

Data de aprovação: 04 de dezembro de 2025

Davi Zacarias de Souza

Doutorado em Ciências

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão

Hernan Vielmo

Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão

Michelle Milanez Franca

Doutorado em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão

FRANCISCO BELTRÃO

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente meu orientador Prof. Dr. Davi Zacarias de Souza, pela orientação, apoio contínuo e dedicação em todas as etapas do projeto.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pelo espaço, estrutura e suporte acadêmico para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório da UTFPR – Câmpus Francisco Beltrão, Ronaldo, Everton e Raquel, pelo suporte nas análises e pela disponibilidade no laboratório.

à CEANMED – Central Analítica Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira, Paraná, Brasil, pelos ensaios realizados”

Ao proprietário da área, Sérgio, pela autorização e confiança para a realização do estudo.

À minha família, especialmente minha mãe Flavia de Lima e meu padrasto Caio Vinicius, pelo apoio incondicional, motivação e compreensão durante toda a trajetória.

À minha parceira de vida e namorada Natália Conceição, pelo apoio emocional, incentivo diário e compreensão.

À aluna Julia Fantini, pela ajuda nas análises laboratoriais e pela contribuição no projeto de Iniciação Científica relacionado.

Aos professores da banca avaliadora, pelas contribuições, sugestões e pelo olhar crítico para o aprimoramento deste trabalho.

RESUMO

A contaminação de solos agrícolas por metais pesados em áreas próximas a rodovias representa potencial risco à qualidade ambiental e à segurança alimentar, especialmente quando associada à produção de alimentos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a presença de metais pesados em solo agrícola de cultivo orgânico localizado às margens da rodovia PR-566, no município de Francisco Beltrão – PR, considerando parâmetros físico-químicos do solo e a influência da distância em relação à rodovia. Foram amostrados 10 pontos ao longo da área de produção, além de um ponto controle próximo da mata nativa adjacente, com coleta de solo na camada de 0–20 cm em triplicatas. Determinaram-se pH em água, nitrogênio total (método de Kjeldahl), carbono orgânico e matéria orgânica (método de Walkley–Black), bem como as concentrações de Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Mo e Fe, obtidas por ICP-OES após digestão ácida segundo o método EPA 3050B. Os resultados indicaram que todos os elementos avaliados se mantiveram dentro de faixas compatíveis com valores naturais para solos da região, não sendo observada diferença estatística significativa entre os locais de coleta. Metais potencialmente relacionados a emissões veiculares apresentaram baixos teores, e a distribuição espacial não indicou tendência de acúmulo associada à rodovia. Assim, nas condições estudadas, o solo da área agrícola não apresentou indicativos de contaminação por metais pesados, e a proximidade com a PR-566 não influenciou os teores observados. **Palavras-chave:** metais pesados; solo agrícola; rodovia; contaminação; cultivo orgânico.

ABSTRACT

Soil contamination by heavy metals in agricultural areas near highways poses potential risks to environmental quality and food safety, especially when associated with food production. This study aimed to evaluate the presence of heavy metals in an organic farming soil located along highway PR-566, in the municipality of Francisco Beltrão, Paraná State, considering physicochemical soil parameters and the influence of distance from the roadway. Ten sampling points were established across the production area, along with a control point near the adjacent native forest, with soil collected from the 0–20 cm layer in triplicate. Soil pH in water, total nitrogen (Kjeldahl method), organic carbon and organic matter (Walkley–Black method), as well as concentrations of Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Mo, and Fe determined by ICP-OES after acid digestion (EPA 3050B), were analyzed. The results indicated that all evaluated elements remained within ranges consistent with natural background levels for soils in the region, with no statistically significant differences among sampling points. Metals potentially associated with vehicular emissions occurred at low concentrations, and their spatial distribution showed no tendency toward accumulation near the highway. Under the evaluated conditions, the agricultural soil showed no indications of heavy metal contamination, and proximity to PR-566 did not influence the observed concentrations.

Keywords: heavy metals; agricultural soil; highway; contamination; organic farming.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVOS	9
2.1	Objetivo Geral	9
2.2	Objetivos Específicos	9
3	REVISÃO DA LITERATURA	10
3.1	Metais Pesados: Conceitos e Características.....	10
3.2	Fontes e Mecanismos de Deposição no Solo	12
3.3	Legislação Aplicada à Gestão de Áreas Contaminadas	14
3.4	Caracterização dos Latossolos na Região de Francisco Beltrão – PR	14
3.5	Impactos dos Metais Pesados nas Propriedades do Solo.....	15
	Indicadores de qualidade do solo: carbono orgânico, matéria orgânica e nitrogênio	15
3.6	Consequências para a Saúde Pública	16
3.7	Métodos Analíticos para Avaliação de Metais Pesados	17
3.8	Agricultura Orgânica e Agroecologia: Relação com o Solo	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1	Caracterização da Área de Estudo e Coleta de Amostras	19
4.2	Determinação do pH.....	21
4.3	Determinação de Metais Pesados.....	22
	Digestão ácida.....	23
	Determinação instrumental.....	23
	Tratamento estatístico das análises	23
4.4	Determinação de Nitrogênio.....	24
4.5	Determinação de Carbono Orgânico e Matéria Orgânica	26

4.6	Determinação da Compactação do Solo	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1	pH do Solo	29
5.2	Nitrogênio Total	30
5.3	Metais Pesados no Solo	31
5.4	Carbono e Matéria orgânica	33
	Tabela 10 - Classificação agronômica da matéria orgânica do solo segundo Embrapa (2018).	35
5.5	Compactação do Solo	36
6	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40
	ANEXO A - QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROPRIETÁRIO DA ÁREA.....	42
	1. Identificação da Propriedade	42
	2. Histórico da Área.....	42
	3. Manejo do Solo.....	42
	4. Certificação Orgânica	43
	5. Uso da Água	43
	6. Interferências Externas.....	43
	7. Produção e Comercialização.....	43
	8. Percepção do Agricultor.....	43
	ANEXO B – CONCENTRAÇÕES INDIVIDUAIS DE METAIS NAS AMOSTRAS ..	44

1 INTRODUÇÃO

A contaminação de solos por metais pesados configura um problema ambiental crescente, especialmente em regiões submetidas a intensa atividade antrópica. Elementos como ferro zinco (Zn), cobre (Cu), cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr), molibdênio (Mo) e ferro (Fe), quando presentes em concentrações elevadas, tendem a permanecer por longos períodos nos horizontes superficiais do solo devido à sua baixa mobilidade e à forte interação com frações minerais e matéria orgânica. A presença desses elementos acima dos níveis naturais representa risco significativo aos ecossistemas, podendo comprometer a qualidade do solo, reduzir a produtividade agrícola e afetar a segurança alimentar (ZHANG et al., 2020; LI et al., 2022; LUO et al., 2018).

No contexto agrícola, concentrações excessivas de metais pesados podem prejudicar o desenvolvimento das culturas, alterar propriedades físico-químicas essenciais — como pH, capacidade de troca catiônica e atividade microbiana — e favorecer a bioacumulação de contaminantes em vegetais consumidos pela população (LI et al., 2022). A problemática torna-se mais evidente em áreas localizadas próximas a rodovias, onde o tráfego de veículos pesados contribui para a deposição atmosférica de partículas metálicas provenientes do desgaste de pneus, sistemas de freio, componentes automotivos e da combustão de combustíveis fósseis. Esses processos são reconhecidos como importantes vetores de poluição difusa do solo (GHAYORANEH; QISHLAQI, 2017; YANG et al., 2022).

No município de Francisco Beltrão – PR, a rodovia PR-566 atravessa zonas predominantemente agrícolas, incluindo propriedades com certificação de produção orgânica. No trecho avaliado, observa-se a presença de barreira vegetal natural, a qual contribui para a proteção da área cultivada, reduzindo parcialmente a deposição direta de partículas provenientes do tráfego rodoviário. Contudo, estudos indicam que, mesmo na presença de barreiras, partículas metálicas finas oriundas do desgaste de pneus, freios e emissões veiculares podem se dispersar a maiores distâncias, especialmente em regiões com fluxo constante de veículos pesados (Luo et al., 2018; Yang et al., 2022). Dessa forma, ainda que a barreira existente ofereça proteção relevante, a proximidade com a rodovia pode influenciar a qualidade do solo, justificando a necessidade de avaliação dos potenciais impactos ambientais e produtivos.

Considerando esse contexto, torna-se fundamental investigar a presença e o comportamento de metais pesados em solos agrícolas localizados às margens das rodovias. A geração de dados locais é essencial para avaliar possíveis influências da rodovia sobre o ambiente edáfico, subsidiar estratégias de monitoramento e assegurar a sustentabilidade da produção agrícola. Assim, este estudo busca quantificar metais pesados, caracterizar parâmetros físico-químicos do solo e analisar variações espaciais em função da distância da rodovia, contribuindo para o entendimento dos potenciais riscos ambientais e à saúde humana.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Medir a concentração de metais pesados em solo agrícola de cultivo orgânico localizado na proximidade da rodovia PR-566, no município de Francisco Beltrão – PR.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os parâmetros físico-químicos do solo, incluindo pH, carbono orgânico, matéria orgânica e nitrogênio total, e dos metais pesados analisados;
- Identificar e quantificar as concentrações de Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Mo e Fe nas amostras de solo, utilizando metodologia de digestão ácida (EPA 3050B) e determinação por ICP-OES;
- Analisar a variação espacial dos metais e dos parâmetros físico-químicos em função da distância da rodovia PR-566, identificando tendências de acúmulo próximas à pista;
- Comparar os resultados obtidos com um ponto de referência ambiental (ponto controle próximo à mata nativa), selecionado por apresentar menor influência antrópica, avaliando potenciais gradientes de contaminação e alterações no solo agrícola associado à proximidade com a rodovia;
- Confrontar os teores de metais pesados com os Valores de Prevenção (VP) e Valores de Investigação (VI) estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para fins de avaliação ambiental.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A contaminação de solos agrícolas por metais pesados constitui um desafio ambiental crescente, intensificado pela expansão urbana, industrialização e intensificação das atividades agrícolas. Áreas agrícolas situadas próximas a rodovias e polos industriais apresentam maior vulnerabilidade à deposição atmosférica de partículas metálicas, provenientes de emissões veiculares, desgaste de componentes automotivos e emissões industriais (LIU et al., 2021; LUO et al., 2018; ZENG et al., 2023). A presença persistente desses elementos em ambientes edáficos desperta preocupação ambiental e sanitária, especialmente quando ocorre interferência direta sobre cultivos destinados à alimentação humana.

3.1 Metais Pesados: Conceitos e Características

Metais pesados são elementos químicos com elevada densidade e baixa biodegradabilidade, capazes de se acumular em diferentes compartimentos ambientais, como solo, água e biota (ALLOWAY, 2013; KABATA-PENDIAS, 2011). No solo, apresentam forte afinidade por partículas minerais e matéria orgânica, o que contribui para sua persistência e favorece processos de adsorção e retenção. Embora alguns desempenhem funções essenciais em plantas e microrganismos — como Zn, Cu, Fe, Mn e Mo — concentrações acima dos níveis adequados podem comprometer processos fisiológicos e bioquímicos (ZHANG et al., 2020; LI et al., 2022).

A toxicidade dos metais no solo depende de sua forma química, mobilidade e biodisponibilidade. Elementos como Cd, Pb e Cr⁶⁺ são amplamente reconhecidos na literatura devido aos seus efeitos adversos à saúde humana, incluindo distúrbios renais, hepáticos, neurológicos e potencial carcinogenicidade (LUO et al., 2018; ZENG et al., 2023). Em solos agrícolas, esses elementos podem interferir na atividade microbiana, na mineralização de nutrientes e na produtividade das culturas (WANG et al., 2023; ZHAO et al., 2021).

As principais características dos metais analisados neste estudo — incluindo funções ambientais e potenciais efeitos tóxicos — estão sintetizadas na Tabela 1, a qual oferece uma visão geral importante para a interpretação dos resultados obtidos.

A seguir, apresentam-se considerações relevantes sobre cada metal avaliado:

- Zinco (Zn): micronutriente essencial, porém, em excesso, pode causar clorose e redução do crescimento das plantas. Em humanos, concentrações elevadas podem interferir na absorção de cobre e afetar funções gastrointestinais (KABATA-PENDIAS, 2011).
- Cobre (Cu): essencial para processos metabólicos, mas concentrações elevadas podem reduzir a respiração microbiana e prejudicar o desenvolvimento radicular (ALLOWAY, 2013). Exposições prolongadas estão associadas a danos hepáticos.
- Cádmio (Cd): elemento não essencial e de alta toxicidade. Mesmo em baixas concentrações, pode causar danos renais, ósseos e efeitos carcinogênicos (ZENG et al., 2023).
- Chumbo (Pb): reconhecido por seus efeitos neurotóxicos, especialmente em crianças. No solo, apresenta elevada persistência e baixa mobilidade, favorecendo acúmulo na camada superficial (LUO et al., 2018).
- Níquel (Ni): essencial em pequenas quantidades, porém concentrações elevadas podem causar fitotoxicidade e apresentar efeitos carcinogênicos (KABATA-PENDIAS, 2011).
- Cromo (Cr): suas formas químicas diferem quanto à toxicidade: o Cr^{3+} é menos móvel e menos tóxico, enquanto o Cr^{6+} é altamente solúvel, móvel e reconhecido como carcinogênico (YANG et al., 2022).
- Molibdênio (Mo): micronutriente envolvido em processos enzimáticos. Em excesso, pode causar distúrbios metabólicos em plantas e ruminantes, embora geralmente ocorra em baixos teores em solos agrícolas (ALLOWAY, 2013).
- Ferro (Fe): abundante em solos derivados de basaltos. Raramente oferece risco toxicológico em ambientes terrestres, mas influencia a dinâmica de outros elementos, especialmente sob condições redox variáveis (SOUZA, 2019).

Tabela 1 – Características dos metais analisados, funções no ambiente e potenciais efeitos tóxicos.

Metal	Essencialidade	Principais funções no solo e nas plantas	Efeitos do excesso no solo	Riscos à saúde humana	Referências
Zn	Essencial	Atuação enzimática, síntese proteica	Redução do crescimento, clorose	Distúrbios gastrointestinais; interfere no Cu	Kabata-Pendias (2011); Alloway (2013)
Cu	Essencial	Fotossíntese, respiração, lignificação	Inibição microbiana e radicular	Toxicidade hepática	Alloway (2013)
Cd	Não essencial	–	Fitotoxicidade; inibição enzimática	Nefrotoxicidade; carcinogênico	Zeng et al. (2023)
Pb	Não essencial	–	Persistência na camada superficial	Neurotoxicidade; alterações hematológicas	Luo et al. (2018)
Ni	Essencial em pequenas quantidades	Atuação na enzima urease	Fitotoxicidade; redução de germinação	Carcinogênico; alergênico	Kabata-Pendias (2011)
Cr	Essencial (Cr ³⁺) / Tóxico (Cr ⁶⁺)	Metabolismo de carboidratos	Estresse oxidativo	Cr ⁶⁺ : carcinogênico; danos respiratórios	Yang et al. (2022)
Mo	Essencial	Fixação biológica de N; nitrato redutase	Toxicidade em ruminantes; distúrbios enzimáticos	Toxicidade rara	Alloway (2013)
Fe	Essencial	Clorofila, respiração, processos redox	Interfere em P, Mn e outros nutrientes	Estresse oxidativo quando biodisponível	Souza (2019)

Fonte: Adaptado de Alloway (2013), Kabata-Pendias (2011), Luo et al. (2018), Zeng et al. (2023), Yang et al. (2022) e Souza (2019).

3.2 Fontes e Mecanismos de Deposição no Solo

As fontes de metais pesados em solos agrícolas podem ser de origem natural ou antrópica. Em ambientes com intensa atividade humana, a deposição atmosférica constitui um dos principais mecanismos de entrada desses elementos no solo. O desgaste de pneus, pastilhas de freio, componentes metálicos e emissões de

combustão veicular contribuem para o aporte de Zn, Cu, Pb, Ni e Cr em áreas adjacentes a rodovias (GHAYORANEH; QISHLAQI, 2017; YANG et al., 2022).

Além das rodovias, atividades industriais — como metalurgia, logística e processamento agroindustrial — também podem liberar partículas contendo metais pesados, posteriormente transportadas pelo vento ou água e depositadas sobre o solo agrícola (NYANTAKYI et al., 2024). Em áreas rurais, o uso de fertilizantes fosfatados, corretivos e defensivos agrícolas pode adicionar Cd, Pb, Zn e Cu ao solo, dependendo da formulação e da frequência de aplicação (ATAFAR et al., 2010; LI et al., 2022).

Os principais tipos de fontes antrópicas e seus mecanismos de entrada no ambiente estão sintetizados na Tabela 2, que apresenta uma visão geral das rotas predominantes de deposição desses elementos em solos agrícolas.

A deposição pode ocorrer por sedimentação direta de partículas (deposição seca) ou por meio da precipitação (deposição úmida). Em geral, tais partículas tendem a se acumular na camada superficial do solo, especialmente em áreas com elevada matéria orgânica ou cobertura vegetal, que atuam como filtros naturais.

Tabela 2 – Principais fontes antrópicas de metais pesados em solos agrícolas e mecanismos de entrada no ambiente.

Fonte antrópica	Metais associados	Mecanismo de entrada no solo	Referências
Desgaste de pneus	Zn, Pb	Deposição atmosférica seca e poeira veicular	Ghayoraneh; Qishlaqi (2017)
Pastilhas de freio	Cu, Sb, Pb	Emissão de partículas finas	Yang et al. (2022)
Combustão veicular	Pb, Ni, Cr	Emissão atmosférica durante combustão	Nyantakyi et al. (2022)
Fertilizantes fosfatados	Cd, Pb	Impurezas em fosfatos agrícolas	Atafar et al. (2010)
Indústrias metalúrgicas	Zn, Cu, Ni, Cr	Emissão de particulados industriais	Zeng et al. (2023)
Atividades agroindustriais	Fe, Cu, Zn	Geração e deposição de poeiras	Oliveira et al. (2021)

Fonte: Adaptado de Ghayoraneh e Qishlaqi (2017), Yang et al. (2022), Nyantakyi et al. (2022), Atafar et al. (2010), Zeng et al. (2023) e Oliveira et al. (2021).

3.3 Legislação Aplicada à Gestão de Áreas Contaminadas

No Brasil, a avaliação da qualidade do solo e o gerenciamento de áreas contaminadas são regulamentados pela Resolução CONAMA nº 420/2009. Essa normativa estabelece três categorias de valores orientadores:

- Valor de Referência de Qualidade (VRQ): corresponde aos teores naturais de cada elemento no solo, determinados por órgãos estaduais. No Paraná, os VRQs são definidos pelo Instituto Água e Terra (IAT).
- Valor de Prevenção (VP): representa a concentração máxima que assegura a qualidade do solo para uso atual e futuro, sem risco à saúde humana e ao ambiente.
- Valor de Investigação (VI): indica concentrações acima das quais podem existir riscos à saúde humana, exigindo estudos detalhados.

Para metais como Zn, Cu, Cr, Ni, Pb e Cd, os VP e VI permitem avaliar se a área apresenta risco potencial associado à contaminação. Não há valores orientadores para Fe e Mo na normativa brasileira, sendo necessária a interpretação com base em literatura técnico-científica (BRASIL, 2009).

3.4 Caracterização dos Latossolos na Região de Francisco Beltrão – PR

Latossolos são amplamente distribuídos no Sudoeste do Paraná e caracterizam-se por elevada profundidade, textura predominantemente argilosa, boa drenagem e acidez natural (EMBRAPA, 2018). Esses solos derivam majoritariamente de rochas basálticas da Formação Serra Geral, apresentam alto teor de óxidos de Fe e Al e são considerados altamente intemperizados.

A elevada capacidade de adsorção desses solos influencia diretamente a mobilidade e a biodisponibilidade dos metais, restringindo sua lixiviação e favorecendo sua retenção na camada superficial (NICOLODI et al., 2008; SOUZA, 2019). Tais características são relevantes para a interpretação dos resultados obtidos neste estudo.

3.5 Impactos dos Metais Pesados nas Propriedades do Solo

A presença de metais pesados em solos agrícolas pode alterar significativamente propriedades físico-químicas e biológicas essenciais para a manutenção da fertilidade e da produtividade. Estudos apontam que concentrações elevadas de metais como Cu, Zn e Cr reduzem a atividade de microrganismos decompositores, aumentam o estresse oxidativo na biota do solo e afetam processos como mineralização da matéria orgânica e ciclagem do nitrogênio (WANG et al., 2023; LI et al., 2022; ZHAO et al., 2021).

Além disso, a presença desses elementos pode diminuir a disponibilidade de fósforo por precipitação ou adsorção em óxidos de Fe e Al, interferir na respiração microbiana e reduzir o crescimento radicular. Em longo prazo, tais alterações podem comprometer o equilíbrio nutricional das plantas, reduzir a produtividade agrícola e afetar a qualidade dos alimentos produzidos. Estratégias de remediação, como biorremediação, fitoextração e aplicação de condicionadores de solo, têm sido sugeridas para mitigar esses impactos e restaurar a saúde do solo (RAJENDRAN et al., 2014).

Indicadores de qualidade do solo: carbono orgânico, matéria orgânica e nitrogênio

A avaliação da qualidade do solo envolve o monitoramento de parâmetros físico-químicos que refletem sua capacidade produtiva e funcional. Entre os indicadores mais utilizados destacam-se o carbono orgânico (CO), a matéria orgânica (MO) e o nitrogênio total (N), componentes diretamente relacionados à fertilidade, estrutura, retenção de água e atividade biológica do solo (BRADY; WEIL, 2013; EMBRAPA, 2017).

Os teores desses atributos variam amplamente entre diferentes classes de solo e sistemas de manejo. No Brasil, diversos autores propõem faixas de interpretação para subsidiar a classificação de solos quanto ao seu estado de qualidade. A Tabela 3 apresenta uma síntese dessas faixas de classificação, utilizadas para interpretar os resultados obtidos nas análises realizadas neste estudo.

Tabela 3 – Classificação de teores de carbono orgânico, matéria orgânica e nitrogênio total em solos brasileiros.

Parâmetro	Baixo	Médio	Alto	Referências
Carbono Orgânico (%)	< 1,5	1,5 – 2,5	> 2,5	Benites et al. (2003); Embrapa (2018)
Matéria Orgânica (%)	< 3,0	3,0 – 5,0	> 5,0	Embrapa (2017); Brady & Weil (2013)
Nitrogênio Total (g/kg)	< 1,0	1,0 – 2,0	> 2,0	Brady & Weil (2013); Silva et al. (2017)
Relação C:N	< 10	10 – 14	> 14	Brady & Weil (2013)

Fonte: Adaptado de Benites et al. (2003), Embrapa (2017, 2018), Brady e Weil (2013).

Essa tabela serve como referência para a interpretação dos resultados apresentados no Capítulo 5, permitindo avaliar o estado de fertilidade do solo, a eficiência do manejo orgânico e possíveis alterações associadas à proximidade da rodovia PR-566.

3.6 Consequências para a Saúde Pública

A contaminação de solos agrícolas por metais pesados representa risco direto à saúde pública, uma vez que esses elementos podem ser absorvidos pelas plantas e acumulados em órgãos comestíveis, entrando na cadeia alimentar humana. Hortaliças cultivadas em solos contaminados apresentam maior tendência à bioacumulação de metais como Cr, Mn, Cu e Zn, aumentando a exposição humana (LUO et al., 2018; ANVISA, 2023; NYANTAKYI et al., 2024).

A exposição prolongada a esses metais está associada a efeitos toxicológicos graves, como:

- Doenças renais e hepáticas, devido ao acúmulo de metais em órgãos de filtração;
- Distúrbios neurológicos, especialmente em exposições crônicas ao Mn (manganismo) e Cr;
- Alterações cardiovasculares decorrentes de estresse oxidativo e inflamação sistêmica;
- Risco aumentado de câncer, particularmente no caso do Cr hexavalente (Cr⁶⁺), reconhecidamente carcinogênico.

Dessa forma, o monitoramento de metais pesados em solos de produção agrícola é essencial para assegurar a segurança alimentar e prevenir danos à saúde humana.

3.7 Métodos Analíticos para Avaliação de Metais Pesados

A avaliação de metais pesados em solos envolve técnicas analíticas capazes de quantificar elementos traço com elevada precisão e sensibilidade. Entre essas técnicas, destaca-se a Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), utilizada neste estudo, que permite a determinação simultânea de diversos elementos metálicos com alta exatidão e ampla faixa linear (YANG et al., 2022; NEHER et al., 2013).

A Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) também é amplamente empregada em análises ambientais, especialmente para quantificação de elementos específicos em baixas concentrações. Já a Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS) oferece limites de detecção ainda menores, sendo recomendada quando os metais estão presentes em níveis traço ou ultratraço.

A caracterização mineralógica do solo, frequentemente realizada por técnicas como Difração de Raios X (DRX), auxilia na compreensão da interação entre metais pesados e os minerais presentes no solo, influenciando processos de adsorção, mobilidade e disponibilidade dos elementos (SOUZA, 2019). A combinação dessas técnicas contribui para uma avaliação mais completa da contaminação e dos fatores que controlam o comportamento dos metais pesados no ambiente edáfico.

3.8 Agricultura Orgânica e Agroecologia: Relação com o Solo

A agricultura orgânica e os sistemas agroecológicos fundamentam-se no manejo sustentável do solo, priorizando práticas que aumentam a matéria orgânica, a estabilidade dos agregados e a atividade biológica, reduzindo a dependência de insumos externos e evitando a aplicação de fertilizantes sintéticos e defensivos químicos (EMBRAPA, 2018; BRASIL, 2003). Esses sistemas tendem a apresentar maior diversidade microbiana, maior teor de carbono orgânico e dinâmica mais equilibrada de nutrientes quando comparados às formas convencionais de cultivo (Nicholodi et al., 2008; Silva et al., 2017).

Em ambientes orgânicos certificados, a proteção do solo contra contaminantes externos é um dos princípios centrais. Barreiras vegetais, uso de cobertura permanente e adubação orgânica contínua contribuem não apenas para melhorar

atributos físico-químicos, mas também para reduzir parcialmente a entrada de poluentes atmosféricos, incluindo partículas metálicas originadas de rodovias ou fontes industriais (ANVISA, 2023; Luo et al., 2018). Apesar disso, estudos demonstram que, mesmo com medidas de proteção, solos orgânicos próximos a estradas podem apresentar acúmulo de metais pesados, devido à dispersão atmosférica de partículas finas, sobretudo de Zn, Cu, Pb e Ni, provenientes do desgaste de pneus, freios e combustíveis (Yang et al., 2022; Oliveira et al., 2021).

A maior presença de matéria orgânica nos solos orgânicos funciona como um importante fator de adsorção e retenção de metais, reduzindo sua biodisponibilidade e, conseqüentemente, seus efeitos tóxicos sobre plantas e micro-organismos (Kabata-Pendias, 2011; Souza, 2019). No entanto, essa capacidade de retenção não elimina totalmente os riscos, uma vez que metais como Cr, Ni e Cd apresentam mobilidade variável e podem ser acumulados na superfície do solo ao longo do tempo (Zeng et al., 2023; Luo et al., 2023).

Assim, compreender as características dos sistemas orgânicos é essencial para interpretar os resultados deste estudo, uma vez que o manejo adotado influencia diretamente a dinâmica dos nutrientes, a retenção de contaminantes e a resposta do solo à deposição atmosférica de partículas metálicas. A investigação realizada em área de produção orgânica certificada permite avaliar não apenas o estado atual do solo, mas também o desempenho das práticas agroecológicas frente a fontes externas de contaminação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da Área de Estudo e Coleta de Amostras

O estudo foi realizado em área agrícola de produção orgânica certificada, localizada às margens da rodovia PR-566, no município de Francisco Beltrão – PR. A Figura 1 apresenta a localização da área de plantio em relação à rodovia, permitindo visualizar a disposição espacial dos pontos amostrais e sua proximidade com a via. O clima predominante é subtropical úmido (Cfa), caracterizado por verões chuvosos e invernos amenos.

A coleta ocorreu em setembro de 2025, sob condições de umidade elevada devido à ocorrência de chuvas. Foram definidos 11 pontos amostrais distribuídos ao longo da área, variando conforme a distância da rodovia. Em cada ponto foram coletadas três amostras (triplicatas), totalizando 33 amostras compostas para análises químicas.

Foi estabelecido um ponto controle situado próximo à área de mata nativa adjacente, selecionado por apresentar menor influência antrópica direta, permitindo comparação com os pontos localizados na área agrícola, conforme recomendação metodológica para estudos ambientais (Conama 420/2009; Kabata-Pendias, 2011). A vegetação presente entre a área de cultivo e a rodovia atua como barreira natural ao transporte de partículas, aspecto ilustrado nas Figuras 2 e 3, que evidenciam a função protetiva da cobertura vegetal na redução da deposição de contaminantes atmosféricos sobre o solo agrícola.

A coleta foi realizada com trado de aço inoxidável na camada de 0–20 cm. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas ao Laboratório de Solos da UTFPR – Câmpus Francisco Beltrão. O georreferenciamento foi obtido com GPS Garmin eTrex 76CSx, registrando latitude, longitude e distância aproximada da rodovia.

Além das amostras de solo, foram obtidas medidas de resistência à penetração ao longo dos pontos amostrais utilizando um penetrômetro eletrônico da marca Falker, modelo PLG1020, equipamento amplamente empregado para avaliação da compactação do solo em profundidade. As leituras foram realizadas diretamente no local, registrando-se valores de resistência (kPa) em diferentes profundidades, com o objetivo de caracterizar o estado físico do solo e verificar possíveis relações entre

compactação, práticas de manejo e variações observadas nos teores de metais pesados. Os dados gerados pelo equipamento foram posteriormente compilados e são apresentados no capítulo de Resultados.


Informações complementares sobre o manejo orgânico (histórico produtivo, adubação, certificação, práticas de conservação do solo e percepção do produtor sobre a rodovia) foram obtidas por meio de questionário estruturado aplicado ao agricultor. O instrumento encontra-se apresentado no Anexo A.

Figura 1 – Localização da área de plantio x rodovia.



Fonte: Google Earth, 2024.

Coordenadas Geográficas: Latitude - 26° 3'19.93"S e Longitude - 52°59'21.11"O

 Pontos de coleta


 Localização da área de plantio

Figura 2 e 3 – Barreira natural da área de plantio x rodovia.



Fonte: A autora, abril/2025.



Fonte: A autora, setembro/2025.

As distâncias dos pontos amostrais em relação à rodovia PR-566 foram obtidas utilizando a ferramenta régua do Google Earth Pro, considerando a menor distância horizontal entre cada ponto e a borda da pista. As coordenadas geográficas e as respectivas distâncias são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Coordenadas geográficas dos pontos de coleta e distância em relação à rodovia PR-566.

Ponto	Latitude (°)	Longitude (°)	Distância até a rodovia (m)
P1	-26.055712	-52.989472	14,6 m
P2	-26.055958	-52.989165	59,8 m
P3	-26.055620	-52.988836	60,0 m
P4	-26.055524	-52.989241	20,0 m
P5	-26.055293	-52.989028	22,5 m
P6	-26.055378	-52.988770	50,4 m
P7	-26.055090	-52.988747	25,5 m
P8	-26.055184	-52.988618	42,8 m
P9	-26.054968	-52.988432	41,8 m
P10 (controle)	-26.054801	-52.988398	31,0 m
P11	-26.054805	-52.988620	15,9 m

Fonte: Dados da autora (2025).

4.2 Determinação do pH

A determinação do pH do solo foi realizada conforme metodologia descrita no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (2017), utilizando apenas água

destilada como solução extratora. A Figura 4 ilustra o procedimento adotado para a análise de pH, conforme aplicado às amostras avaliadas neste estudo. Para cada amostra, foram pesados 10 g de solo seco ao ar e peneirado em malha de 2 mm, os quais foram transferidos para béqueres contendo 25 mL de água destilada, estabelecendo-se a relação solo:solução de 1:2,5 (m/v), recomendada para análises de rotina.

As suspensões foram agitadas manualmente e deixadas em repouso por 1 hora, garantindo o equilíbrio entre a fase sólida e a fase líquida. Após esse período, o pH foi determinado utilizando-se um potenciômetro digital previamente calibrado com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0, seguindo os procedimentos de calibração e leitura indicados pelo fabricante.

Os valores obtidos foram registrados individualmente para cada ponto amostral e empregados no tratamento estatístico descrito na seção de Resultados e Discussões.

Figura 4 – Análise pH.



Fonte: A autoria própria (2025)

4.3 Determinação de Metais Pesados

A quantificação dos metais Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Mo e Fe foi realizada segundo o método EPA 3050B – Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils (USEPA, 1996), com adaptações para digestão em bloco digestor, procedimento adotado nos laboratórios da UTFPR.

Digestão ácida

- Cerca de 1,00 g de solo seco (peneira 0,2 mm) foi transferido para tubos de digestão previamente descontaminados com HNO₃ 10%;
- Adicionaram-se 10 mL de HNO₃ 1:1, deixando a amostra em pré-reação por 30 minutos;
- Os tubos foram aquecidos a 95 ± 5 °C por 15 minutos;
- Após resfriamento, adicionaram-se 5 mL de HNO₃ concentrado, repetindo-se o aquecimento até cessação de vapores marrons;
- Adicionaram-se 2 mL de água destilada e, em seguida, 5 mL de H₂O₂ 30% em alíquotas de 1 mL, mantendo aquecimento contínuo;
- As amostras permaneceram no bloco por cerca de 2 horas;
- Após resfriamento, adicionaram-se 10 mL de HCl concentrado sob refluxo por 15 minutos;
- Os digestatos foram filtrados utilizando filtros PES (polietersulfona) descartáveis e completados para 50 mL com água destilada.

Determinação instrumental

A detecção foi realizada por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) no Laboratório Multiusuário da UTFPR – Câmpus Medianeira. Os resultados foram expressos em mg kg⁻¹ de solo seco.

As concentrações foram comparadas aos Valores de Prevenção (VP) e Valores de Investigação (VI) estabelecidos pela CONAMA 420/2009 para fins ambientais.

Tratamento estatístico das análises

Todas as determinações químicas foram realizadas em triplicata para cada ponto de amostragem, visando garantir reprodutibilidade e minimizar a variabilidade analítica.

Para verificar se havia diferença estatisticamente significativa entre as triplicatas de cada elemento, aplicou-se a análise de variância de uma via (ANOVA one-way) no software Microsoft Excel® (versão 365), considerando nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$).

Valores de $p > 0,05$ foram considerados indicativos de ausência de diferença significativa entre as triplicatas, permitindo utilizar a média dos três valores como concentração representativa do ponto de coleta.

As tabelas completas geradas nos testes estatísticos estão apresentadas em Resultados e Discussões.

Figura 5 e 6 – Preparação de amostras para análise de metais pesados.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.4 Determinação de Nitrogênio

A determinação do nitrogênio total nas amostras de solo foi realizada pelo método de Kjeldahl (KJELDAHL, 1883), conforme descrito por Bremner (1965) e Bremner e Mulvaney (1982), com adaptações para o uso de bloco digestor. O método baseia-se na digestão ácida úmida do solo, promovendo a conversão do nitrogênio orgânico em íons amônio (NH_4^+), os quais posteriormente são destilados e titulados, permitindo a quantificação do nitrogênio total no solo.

Para cada análise, aproximadamente 0,500 g de solo seco ao ar foi pesado em tubos de digestão de vidro borossilicato (25 × 250 mm). Em seguida, adicionaram-se 0,7 g da mistura catalítica composta por sulfato de sódio (Na_2SO_4), sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) e selênio metálico, na proporção recomendada por Bremner e Mulvaney (1982). Foram adicionados 2 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, iniciando-se a digestão no bloco digestor a 250 °C por 15–20 minutos,

elevando-se gradualmente até 350–375 °C até o clareamento total da solução, indicando digestão completa da matéria orgânica. As amostras permaneceram nessa temperatura por aproximadamente duas horas. Após resfriamento, adicionaram-se 5 mL de água destilada, homogenizando-se a solução resultante.

Os mesmos frascos utilizados na digestão foram conectados ao destilador de nitrogênio, evitando transferência e possíveis perdas. A destilação por arraste de vapor foi realizada mediante adição de NaOH 10 mol L⁻¹, que converte o amônio em amônia (NH₃). O gás liberado foi capturado em solução de ácido bórico (H₃BO₃) contendo indicador misto (verde de bromocresol e vermelho de metila). O destilado obtido (35 a 40 mL) foi titulado com H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹ até a viragem do indicador.

Os resultados foram calculados de acordo com a expressão:

$$N (g kg^{-1}) = \frac{(V_{\text{ácido}} - V_{\text{branco}}) \times N_{\text{ácido}} \times 14 \times 1000}{m}$$

Em que:

- *V*_{ácido}: é o volume de solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹) gasto na titulação da amostra, expresso em mililitros (mL);
- *V*_{branco}: é o volume médio de titulante consumido no branco analítico, utilizado para corrigir interferências provenientes dos reagentes e do procedimento experimental;
- *N*_{ácido}: corresponde à molaridade da solução titulante de H₂SO₄ (0,025 mol L⁻¹);
- O valor 14: representa a massa atômica do nitrogênio (mg de N por mmol); o fator 1000 é aplicado para converter o resultado final para a unidade g kg⁻¹;
- *E m*: é a massa da amostra de solo utilizada na digestão, expressa em miligramas (mg).

Dessa forma, a equação permite quantificar o teor de nitrogênio total presente nas amostras de solo, corrigido pelo branco e expresso em g kg⁻¹, unidade amplamente utilizada em avaliações de fertilidade e qualidade do solo (EMBRAPA, 2017).

Todas as determinações foram realizadas em duplicata, e os resultados médios serão discutidos posteriormente, com base em solos agrícolas e orgânicos característicos da região.

Figura 7 – Preparação de soluções para análise de nitrogênio.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.5 Determinação de Carbono Orgânico e Matéria Orgânica

A determinação do carbono orgânico e da matéria orgânica foi realizada pelo método de Walkley–Black modificado, conforme descrito no *Manual de Métodos de Análise de Solo* da EMBRAPA (2017) e no POP de Matéria Orgânica da EMBRAPA Semiárido (1997), com adaptações para as condições laboratoriais da UTFPR – Câmpus Francisco Beltrão.

Após secagem do solo em estufa a 60 °C por 24 horas, as amostras foram destorroadas, peneiradas em malha de 0,2 mm, e uma alíquota de 0,2000 g foi transferida para erlenmeyers de 250 mL.

A solução oxidante foi preparada previamente, incorporando ácido sulfúrico concentrado diretamente à solução de dicromato de potássio, de modo a reduzir riscos de manipulação e assegurar homogeneidade da mistura, conforme adaptações realizadas no laboratório. Antes das análises, foram preparados brancos em triplicata para verificar a estabilidade das soluções e o controle de qualidade do método. Além disso, para cada amostra analisada, foi realizado um branco subsequente, seguindo o procedimento recomendado para métodos titulométricos.

Para promover a oxidação do carbono orgânico, 10 mL da solução oxidante foram adicionados ao erlenmeyer contendo a amostra. Os frascos foram aquecidos em chapa a 150 °C por aproximadamente 10 minutos, até o desenvolvimento de

coloração acastanhada característica da oxidação do carbono. Após o aquecimento, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente.

Posteriormente, foram adicionados 80 mL de água destilada, 2 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) e três gotas de solução indicadora de difenilamina, permitindo estabilização do meio e identificação visual do ponto final. Em seguida, procedeu-se à titulação do excesso de dicromato não reagido com solução de sulfato ferroso amoniacal $0,05 \text{ mol L}^{-1}$, até a mudança da coloração de violeta para verde, indicando o término da reação redox.

O teor de carbono orgânico foi calculado pela equação recomendada pela EMBRAPA (2017), após correção pela prova em branco e utilização do fator 1,33, correspondente à oxidação incompleta típica do método Walkley–Black. A matéria orgânica foi estimada a partir da conversão de Van Bemmelen (1890), multiplicando-se o teor de carbono orgânico por 1,724. Todas as análises foram conduzidas em duplicata, assegurando precisão e confiabilidade dos resultados.

Com dicromato diluído e correção pela prova em branco, a expressão geral para o cálculo do carbono orgânico é:

$$C_{org} = \frac{0,003 \cdot V_d \cdot (V_b - V_a) \cdot \frac{40}{V_b} \cdot 10}{m}$$

Onde:

C_{org} = carbono orgânico (g kg^{-1});

V_d = volume total da solução de dicromato usado na digestão (mL) → 10 mL;

V_a = volume gasto de sulfato ferroso amoniacal na titulação da amostra (mL);

V_b = volume gasto de ferroso na titulação do branco aquecido (mL) → 80 mL;

m = massa de solo (g) → 0,2000g;

0,003 = fator estequiométrico do carbono;

$40 / V_b$ = correção da normalidade do dicromato a partir do branco;

10 = conversão para g kg^{-1} .

Com esses valores fixos (V_d , V_b , m), a equação se simplifica para:

$$C_{org} (\text{g kg}^{-1}) = 0,75 \cdot (V_b - V_a)$$

Ou seja:

$$C_{org} = 0,75 \cdot (80 - V_a)$$

Depois, a matéria orgânica é calculada por:

$$MO (g\ kg^{-1}) = C_{org} \cdot \frac{100}{58} \approx C_{org} \cdot 1,724$$

Figura 8 – Preparação de solução para análise de Carbono e Matéria Orgânica.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.6 Determinação da Compactação do Solo

A compactação do solo foi avaliada por meio de um penetrômetro eletrônico de impacto da marca Falker, modelo PLG1020, conforme procedimentos de calibração e uso recomendados pelo fabricante. O equipamento registra automaticamente a resistência à penetração (RP) do solo em kPa, à medida que a haste é introduzida no perfil, permitindo a determinação contínua da compactação em diferentes profundidades.

As medições foram realizadas nos mesmos pontos utilizados para a coleta de solo, com leituras por ponto, totalizando 11 perfis de resistência. As determinações seguiram as recomendações metodológicas de avaliação física do solo, onde valores elevados de RP podem indicar limitações ao crescimento radicular, redução da infiltração e alterações na dinâmica de água e nutrientes (EMBRAPA, 2017; Silva et al., 2015).

Os dados obtidos foram armazenados automaticamente pelo equipamento e posteriormente exportados via software da Falker para planilhas eletrônicas, sendo analisados quanto à variação espacial e possíveis associações com a proximidade da rodovia e com os parâmetros químicos determinados em laboratório.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 pH do Solo

Os valores de pH variaram entre 5,03 e 5,79, caracterizando acidez moderada, compatível com Latossolos da região Sudoeste do Paraná (EMBRAPA, 2018). A média geral foi de 5,40, com desvio-padrão de 0,20, indicando baixa variabilidade química entre os pontos.

O ponto controle (PC), localizado próximo à vegetação nativa, apresentou pH 5,48, situando-se próximo da média geral e sugerindo que o manejo orgânico de longo prazo contribuiu para estabilidade da acidez do solo (BRADY; WEIL, 2013).

No conjunto, os resultados indicam que o pH permanece dentro de uma faixa adequada à maioria das culturas, com influência limitada da rodovia, corroborando estudos que apontam que o pH é menos sensível a deposições atmosféricas metálicas quando há tamponamento orgânico no solo (ZHANG et al., 2020; LI et al., 2022).

Tabela 5 – resultados pH - amostras solo 1:2,5 (10g solo 25mL água destilada).

	pH
P1	5,79
P2	5,53
P3	5,56
P4	5,44
P5	5,03
P6	5,29
P7	5,22
P8	5,36
P9	5,26
P10	5,42
PC (controle)	5,48
Média	5,40

Fonte: Dados da autora (2025).

DP (Desvio Padrão) = 0,20;

CV (Coeficiente de Variação) = 3,70%.

5.2 Nitrogênio Total

A quantificação de nitrogênio total foi realizada pelo método de Kjeldahl, seguindo as adaptações descritas por Bremner (1965) e Bremner & Mulvaney (1982), com cálculo baseado na diferença entre o volume titular gasto nas amostras e no branco analítico. Os valores foram convertidos para percentual de nitrogênio e posteriormente expressos em g kg^{-1} , conforme recomendado pela Embrapa (2017).

As concentrações de nitrogênio total variaram entre 0,38 e 0,55 g kg^{-1} , com média geral de 0,49 g kg^{-1} , desvio-padrão de 0,05 g kg^{-1} e coeficiente de variação de 10,1%, caracterizando baixa variabilidade entre pontos. Esses valores são compatíveis com solos sob manejo orgânico de longa duração, que geralmente apresentam teores moderados de nitrogênio devido ao aporte contínuo de adubos orgânicos e à maior atividade microbiana (SILVA et al., 2017; BRADY; WEIL, 2013).

O ponto controle (PC) apresentou o maior valor (0,55 g kg^{-1}), o que pode ser atribuído ao acúmulo de serapilheira e à menor interferência antrópica. Não foi observada tendência consistente de aumento ou redução dos valores de nitrogênio em função da distância da rodovia PR-566, o que indica que a presença da barreira natural de vegetação pode estar atuando como filtro físico, reduzindo a influência direta da rodovia nos processos de ciclagem do nitrogênio. Estudos semelhantes mostram que áreas protegidas por vegetação tendem a apresentar maior estabilidade nos atributos químicos do solo (LI et al., 2022; ZHAO et al., 2021).

Tabela 6 – Teores de nitrogênio total (g kg^{-1}) do solo nos diferentes pontos amostrados.

Ponto	V méd (mL)	Massa (g)	%N	N (g kg^{-1})
P1	2.05	0.4995	0.0504	0.50
P2	1.95	0.5000	0.0476	0.48
P3	2.15	0.5000	0.0532	0.53
P4	1.90	0.5015	0.0459	0.46
P5	2.10	0.4990	0.0520	0.52
P6	2.00	0.4995	0.0479	0.48
P7	2.10	0.5005	0.0523	0.52
P8	1.95	0.5005	0.0474	0.47
P9	2.05	0.5010	0.0503	0.50
P10	1.55	0.4995	0.0376	0.38
PC	2.20	0.4975	0.0550	0.55
Média Geral N (g kg^{-1})	0,49			
Desvio Padrão	0,05			
Coeficiente de variação (CV%)	10,1			

Fonte: Dados da autora (2025).

Figura 9 – Titulação de amostra para Nitrogênio.



Fonte: Autoria própria (2025)

5.3 Metais Pesados no Solo

As concentrações de Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Mo e Fe apresentaram valores consistentes entre as triplicatas, conforme verificado pela ANOVA one-way ($p > 0,05$ para todos os elementos), o que demonstra estabilidade analítica e permite o uso das médias como valores representativos de cada ponto amostrado. A partir dessas médias, observou-se que os teores obtidos para todos os metais permaneceram dentro da faixa esperada para solos agrícolas da região Sul do Brasil, considerando valores de referência de qualidade estabelecidos pela literatura nacional e internacional (CETESB, 2016; EMBRAPA, 2018; Kabata-Pendias, 2011).

O zinco e o cobre apresentaram concentrações compatíveis com a variabilidade natural de solos de textura média a argilosa, não indicando incremento associado ao tráfego rodoviário. Os valores de cádmio e chumbo foram baixos, próximos ao limite de detecção, e característicos de áreas sem aporte relevante de fontes antrópicas, o que está de acordo com estudos que apontam baixa mobilidade desses elementos em solos agrícolas manejados sem contaminação pontual. Para níquel e cromo, os teores observados situaram-se dentro do intervalo geogênico comumente relatado para solos derivados de materiais basálticos e sedimentares da região, não havendo evidência de enriquecimento que possa ser associado à rodovia.

O molibdênio, elemento que geralmente ocorre em baixas concentrações em solos não impactados, apresentou valores compatíveis com a literatura e sem variações que sugerissem influência externa. O ferro, por sua vez, apresentou os

maiores teores entre os metais analisados, o que era esperado por ser um elemento majoritário no solo e refletir características do material de origem. As pequenas variações observadas ao longo dos pontos representam diferenças naturais de horizonte, textura e conteúdo de matéria orgânica.

De modo geral, a distribuição espacial dos metais não apresentou tendência de aumento em direção à via, e os valores foram semelhantes aos observados no ponto controle. A presença de barreiras naturais no local — incluindo vegetação densa, relevo irregular e distância física entre a rodovia e a área cultivada — pode ter favorecido a retenção de partículas emitidas pelo tráfego, reduzindo a deposição direta no solo. Assim, os teores identificados correspondem predominantemente à composição natural do solo da área de estudo, sem evidências de influência significativa da rodovia PR-566 no acúmulo de metais.

Avaliação estatística das triplicatas (ANOVA)

Para assegurar a repetibilidade e a consistência das análises laboratoriais, aplicou-se ANOVA one-way às triplicatas de cada metal. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 7, que apresenta as médias, desvios-padrão, valores correspondentes ao ponto controle e os valores-p associados ao teste estatístico.

De forma geral, os resultados demonstram que os metais analisados apresentaram concentrações compatíveis com a variabilidade natural de solos agrícolas da região sudoeste do Paraná. A ausência de diferenças estatísticas entre as triplicatas ($p > 0,05$) reforça a confiabilidade das análises e confirma que não houve interferência significativa da proximidade da rodovia PR-566 nos teores de metais do solo amostrado. A presença da barreira natural (vegetação densa e desnível do terreno) possivelmente contribuiu para minimizar a deposição de partículas provenientes do tráfego de veículos, favorecendo a preservação da qualidade do solo na área estudada.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas (P1–P10), ponto controle (PC) e resultados do teste ANOVA.

Metal	Média (1–10)	Desvio-padrão (1–10)	PC	Valor-p (ANOVA)	Interpretação
Zn	0,15635	0,123856	0,3667	0,291	Sem diferença significativa
Cu	0,44201	0,045789	0,3833	0,434	Sem diferença significativa
Cd	0,00042	0,000132	0,0003	0,956	Sem diferença significativa
Pb	0,01233	0,001331	0,0113	0,800	Sem diferença significativa
Ni	0,01191	0,002632	0,0087	0,794	Sem diferença significativa
Cr	0,11067	0,008560	0,1033	0,168	Sem diferença significativa
Mo	0,19598	0,016315	0,1767	0,361	Sem diferença significativa
Fe	85,78667	6,712105	77,1600	0,400	Sem diferença significativa

Fonte: Dados da autora (2025).

PC = ponto controle.

5.4 Carbono e Matéria orgânica

A determinação do carbono orgânico e da matéria orgânica foi realizada pelo método de Walkley–Black modificado, com fator de correção 1,33 conforme Embrapa (2017). As Figuras 10 e 11 ilustram as etapas de análise e titulação das amostras, evidenciando o procedimento adotado no laboratório para quantificação de carbono e matéria orgânica.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8, os quais mostram que os valores de carbono orgânico variaram entre 2,73% e 3,66%, enquanto a matéria orgânica oscilou entre 4,71% e 6,30%. As médias de 3,29% para carbono orgânico e 5,66% para matéria orgânica, bem como os coeficientes de variação inferiores a 10% (Tabela 9), indicam baixa variabilidade entre os pontos amostrados e demonstram homogeneidade química na área analisada.

Esses valores enquadram-se nas faixas consideradas médias a altas para solos agrícolas segundo os critérios de interpretação da Embrapa (2018), apresentados na Tabela 10. Essa classificação é compatível com sistemas orgânicos de longa duração, nos quais há manutenção contínua de resíduos vegetais, maior aporte de compostos orgânicos e estímulo à atividade microbiana. Estudos como os

de Brady e Weil (2013) e Nicolodi et al. (2008) destacam que sistemas orgânicos tendem a apresentar teores mais elevados de carbono e matéria orgânica devido ao menor revolvimento do solo e ao manejo conservacionista.

O ponto controle apresentou valores próximos à média geral, reforçando que a vegetação nativa exerce efeito estabilizador sobre o acúmulo de carbono no solo. A ausência de diferenças expressivas entre os pontos sugere que, apesar da proximidade com a rodovia PR-566, não houve interferência significativa nos estoques de carbono e matéria orgânica, possivelmente devido à barreira natural de vegetação existente entre a pista e a área de produção.

Esses resultados indicam que o sistema orgânico da propriedade apresenta boa qualidade edáfica, favorecendo a ciclagem de nutrientes, a estruturação do solo e a resiliência frente a influências externas, conforme observado em estudos semelhantes (LI et al., 2022; ZHAO et al., 2021).

Tabela 8 – Resultados das análises de Carbono Orgânico e Matéria Orgânica pelo método de Walkley–Black (modificado).

Ponto	V (mL)	C (%)	MO (%)
P1	51,75	2,73	4,71
P2	43,05	3,54	6,09
P3	50,25	2,89	4,98
P4	49,60	2,98	5,13
P5	44,55	3,37	5,81
P6	43,40	3,50	6,03
P7	43,30	3,51	6,05
P8	42,20	3,66	6,30
P9	43,30	3,51	6,05
P10	46,90	3,08	5,31
PC	44,65	3,35	5,79

Fonte: Dados da autora (2025).

Tabela 9 - Estatísticas gerais (P1–P11)

Parâmetro	Corg (%)	MO (%)
Média	3,29	5,66
Desvio-padrão	0,31	0,53
CV (%)	9,4	9,3

Fonte: Dados da autora (2025).

CV % = Coeficiente de Variação.

- CV abaixo de 10% indica baixa variabilidade (Pimentel-Gomes, 2009);
- Dados estatisticamente consistentes, sem diferenças significativas entre pontos.

Sobre o ponto controle (PC):

- Valor de Corg: 3,35% (muito próximo da média 3,29%);
- Como esperado para mata adjacente, tem MO moderadamente maior que áreas cultivadas;
- Diferença pequena → reforça baixa interferência da rodovia graças à barreira natural.

Interpretação agronômica,

Tabela 10 - Classificação agronômica da matéria orgânica do solo segundo Embrapa (2018).

MO (%)	Classificação
< 2%	Muito baixa
2–4%	Baixa
4–6%	Média
> 6%	Alta

Fonte: Adaptado de Embrapa (2018).

Figura 10 e 11– Análise e titulação de amostras para Carbono e MO.

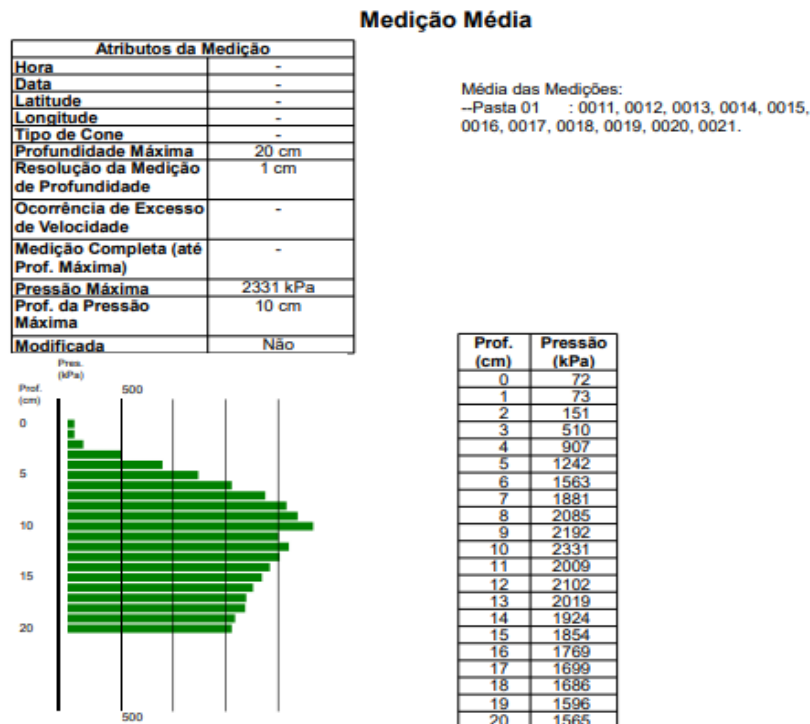


Fonte: A autoria própria (2025)

5.5 Compactação do Solo

A resistência do solo à penetração (RP) foi avaliada por meio do penetrômetro eletrônico PenetroLOG PLG1020 (Falker®), considerando as medições correspondentes aos pontos de coleta P1 a P11 (identificados como 0011 a 0021 no software). A profundidade máxima analisada foi de 20 cm, suficiente para representar a camada explorada pelas culturas e utilizada como referência em estudos de qualidade física do solo. A Figura 12 apresenta o perfil médio de resistência obtido a partir do conjunto das 11 medições, gerado automaticamente pelo software Falker – Compactação do Solo.

Figura 12 - Média da Resistência à Penetração (RP)



Fonte: Dados da autora (2025).

A curva média apresenta um comportamento típico de Latossolos sob uso agrícola contínuo, caracterizado por aumento progressivo da resistência até cerca de 10 cm de profundidade e posterior redução gradual. Esse padrão está associado à estrutura granular da camada superficial e à reorganização natural das partículas em

função do teor de argila, umidade e histórico de manejo (DEXTER, 2004; ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996).

a) Camada superficial (0–3 cm)

Os valores iniciais (aproximadamente 70 a 150 kPa) indicam baixa resistência à penetração, compatível com solos manejados organicamente, nos quais a elevada matéria orgânica favorece maior agregação e reduz a compactação superficial. Essa característica é coerente com os valores de pH, N total e matéria orgânica observados, que evidenciam boa qualidade físico-química do solo.

b) Camada intermediária (3–10 cm)

A resistência aumenta gradualmente até atingir valores próximos de 2.300 kPa aos 10 cm, representando o ponto de maior compactação do perfil. Embora esse intervalo apresente valores considerados moderadamente restritivos ao crescimento radicular, segundo limites descritos por Soil Survey Staff (1993) e Dexter (2004), o valor máximo observado permanece dentro da faixa considerada aceitável para solos agrícolas sob manejo conservacionista.

Esse comportamento pode resultar de processos naturais de adensamento em Latossolos e de eventuais passagens de máquinas em anos anteriores, sem indicar compactação severa. A ausência de picos abruptos de resistência sugere que o manejo orgânico contribui para estabilidade estrutural.

c) Camada subsuperficial (10–20 cm)

Após o valor máximo aos 10 cm, a resistência apresenta tendência de redução, atingindo cerca de 1.560 kPa aos 20 cm. Essa diminuição indica maior porosidade na subsuperfície e ausência de camadas adensadas, condição desejável para o desenvolvimento radicular e para a permeabilidade do solo.

A literatura aponta que Latossolos frequentemente exibem maior estabilidade estrutural abaixo de 10–12 cm devido à predominância de microagregados estáveis (EMBRAPA, 2018; SOUZA, 2019).

d) Comparação com o ponto controle (PC)

Considerando que os valores apresentados representam a média geral da área, não foi possível individualizar a curva do ponto controle. No entanto, os resultados de pH, nitrogênio e matéria orgânica do PC apontam maior estabilidade física e menor perturbação antrópica, o que sugere que sua resistência tende a ser inferior à média da área agrícola. Essa inferência está de acordo com evidências de que ambientes sob cobertura vegetal contínua apresentam menor compactação natural (BRADY; WEIL, 2013).

Os valores obtidos indicam que:

- ✓ Não há presença de camadas compactadas severas;
- ✓ O solo apresenta boa estrutura física e capacidade de infiltração;
- ✓ A resistência se mantém dentro de limites compatíveis com cultivos orgânicos;
- ✓ O manejo de longo prazo contribuiu para a manutenção da qualidade estrutural;
- ✓ A proximidade com a PR-566 não resultou em impactos mensuráveis na compactação do solo.

A análise conjunta com os demais indicadores (metais pesados, carbono orgânico, nitrogênio e pH) confirma que o sistema produtivo apresenta estabilidade e não apresenta sinais de degradação estrutural ou química.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou as concentrações de metais pesados em solo agrícola de cultivo orgânico localizado nas proximidades da rodovia PR-566, no município de Francisco Beltrão – PR, com o objetivo de identificar possíveis indícios de contaminação associada ao tráfego veicular. As análises físico-químicas realizadas (pH, nitrogênio total, carbono orgânico, matéria orgânica e metais Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Mo e Fe) demonstraram que os valores obtidos se mantiveram dentro das faixas esperadas para solos agrícolas da região, segundo limites e valores de referência amplamente adotados na literatura.

Os metais analisados apresentaram baixa variabilidade entre réplicas e entre pontos, e a ANOVA indicou ausência de diferenças estatísticas significativas ($p > 0,05$), reforçando a homogeneidade dos resultados. Os teores observados foram compatíveis com condições naturais do solo e não evidenciaram incrementos relacionados à proximidade com a rodovia. Elementos comumente associados a emissões veiculares, como Pb, Cd, Zn e Cu, apresentaram concentrações reduzidas e próximas aos valores geogênicos.

Considerando também as características ambientais do local — como presença de barreiras naturais (vegetação e distância da via) — conclui-se que não houve influência significativa do tráfego rodoviário no acúmulo de metais pesados na área cultivada. Os resultados reforçam a importância de práticas conservacionistas e da manutenção da vegetação no entorno de áreas agrícolas situadas próximas a rodovias, contribuindo para a proteção do solo e prevenção de processos de contaminação difusa.

De modo geral, os resultados apontam que o sistema de produção orgânica contribui para a manutenção da qualidade física e química do solo, garantindo estabilidade nutricional, baixos níveis de contaminação e condições adequadas para o desenvolvimento vegetal. Dessa forma, na área estudada, a proximidade com a rodovia PR-566 não representa, até o momento, risco relevante de contaminação do solo por metais pesados. Recomenda-se, entretanto, a continuidade do monitoramento ambiental, especialmente em relação a parâmetros atmosféricos e à deposição de partículas metálicas, a fim de garantir a manutenção da qualidade do solo e da segurança da produção orgânica local.

REFERÊNCIAS

- ADIMALLA, N.; QIAN, H.; LI, P. Geochemical characterization and evaluation of heavy metal contamination in agricultural soils of transition zone between basaltic and granitic terrains in India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 171, p. 194–205, 2019.
- ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.
- ATAFAR, Z. et al. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 160, p. 83–89, 2010.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. The nature and properties of soils. 15. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2013.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas. *Diário Oficial da União, Brasília, DF*, 30 dez. 2009.
- CHEN, M. et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in roadside farmland soil in China. *Science of the Total Environment*, v. 639, p. 12–20, 2018.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.
- GHAYORANEH, M.; QISHLAQI, A. Concentration, distribution and speciation of toxic metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in the northwest of Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 39, p. 1379–1393, 2017.
- KARA, K. et al. Heavy metal stress alters nitrogen cycling and microbial activity in agricultural soils. *Journal of Hazardous Materials*, v. 403, p. 123–131, 2021.
- LI, Y. et al. Changes in soil microbial communities and soil chemical properties caused by heavy metal pollution: A review. *Environmental Pollution*, v. 303, p. 119–125, 2022.
- LIU, R. et al. Response of soil microbial biomass and enzyme activities to soil iron concentrations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 214, p. 112108, 2021.
- LUO, Y. et al. Heavy metal contamination in soils near roads: A meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, p. 3455–3469, 2018.

LUO, Y. et al. Recent advances in understanding heavy metal accumulation in soils. *Journal of Hazardous Materials*, v. 442, p. 130024, 2023.

NEHER, D. A. et al. Soil microfaunal responses to heavy metal contamination. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 57, p. 449–458, 2013.

NICOLÓDI, R. et al. Caracterização física, química e biológica de um Latossolo sob sistemas de manejo orgânico e convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 6, p. 2831–2839, 2008.

NYANTAKYI, A. et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soils near highways. *Science of the Total Environment*, v. 806, p. 150632, 2022.

REDE ECOVIDA. Normas e procedimentos para certificação participativa. Florianópolis: Rede Ecovida de Agroecologia, 2020.

SOUZA, V. B. de. Influência de propriedades físico-químicas do solo na retenção de metais pesados em Latossolos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019.

YANG, J. et al. Sources, contamination and ecological risk of heavy metals in agricultural soil of a peri-urban area in China. *Environmental Pollution*, v. 309, p. 119752, 2022.

ZENG, X. et al. Assessment of cadmium pollution and associated health risks in agricultural soils. *Journal of Environmental Management*, v. 336, p. 117728, 2023.

ZHANG, X. et al. Heavy metal pollution and human health risk assessment in agricultural soils in a typical peri-urban area of China. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, 2020.

ZHAO, F. et al. Impact of heavy metal stress on soil microbial biomass, activity and community structure. *Science of the Total Environment*, v. 758, p. 143–222, 2021.

ANEXO A - QUESTIONÁRIO APLICADO AO PROPRIETÁRIO DA ÁREA

Sítio Oásis Ecológico – Francisco Beltrão (PR)

Entrevistado: agricultor responsável pelo manejo há aproximadamente 30 anos;

Finalidade: caracterização da área, histórico de manejo e identificação de fatores que influenciam a qualidade do solo.

1. Identificação da Propriedade

- **Nome da propriedade:** Sítio Oásis Ecológico
 - **Proximidade da rodovia PR-566:** Sim
 - **Uso atual da área:** Produção agrícola orgânica diversificada (hortaliças, milho, feijão etc.)
 - **Certificação orgânica:** Sim – Rede Ecovida de Agroecologia (certificação participativa)
-

2. Histórico da Área

- **Tempo de uso agrícola:** Desde a década de 1950 (período de colonização).
 - **Histórico de culturas:**
 - Antes: agricultura convencional (tipos desconhecidos pelo atual proprietário).
 - Atualmente: hortaliças variadas, milho, feijão e outras culturas.
 - **Uso passado de adubos e defensivos químicos:** Sim, antes da conversão para manejo ecológico.
 - **Ano da conversão para produção ecológica:** 1990.
 - **Manejo atual:** exclusivamente ecológico desde então.
-

3. Manejo do Solo

- **Adubação orgânica:**
 - Cama de aviário curtida e compostada
 - Compostagem com esterco e restos vegetais
 - **Frequência:** 1 a 2 vezes ao ano
- **Correções de pH:** Sim (uso de pó de rocha e calagem)

- **Práticas de conservação do solo:** terraceamento, cobertura verde, rotação de culturas
-

4. Certificação Orgânica

- **Entidade certificadora:** Rede Ecovida de Agroecologia
 - **Registros e inspeções:** Sim, com documentação arquivada
-

5. Uso da Água

- **Fonte de irrigação:** nascente e córrego
 - **Análise prévia da água:** Não
-

6. Interferências Externas

- **Efeitos percebidos da rodovia:** poeira, fuligem e ruído
 - **Contaminação por vizinhos:** não há histórico
-

7. Produção e Comercialização

- **Destinação da produção:** consumo próprio, feiras locais e merenda escolar
 - **Problemas com compradores:** Não houve questionamentos sobre resíduos
-

8. Percepção do Agricultor

- **Preocupação com a proximidade da rodovia:** Sim
- **Mudanças percebidas na fertilidade do solo:** solo considerado equilibrado em nutrientes ao longo dos anos

ANEXO B – CONCENTRAÇÕES INDIVIDUAIS DE METAIS NAS AMOSTRAS

Tabela – Resultados Individuais das Amostras (A, B, C) em mg kg⁻¹

- Ponto 1

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
1A	0,13	0,47	0,0007	0,015	0,017	0,12	0,22	97,54
1B	0,14	0,58	0,0007	0,014	0,013	0,13	0,20	93,42
1C	0,14	0,53	0,0008	0,013	0,014	0,12	0,21	88,72

- Ponto 2

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
2A	0,12	0,45	0,0005	0,013	0,010	0,11	0,19	84,50
2B	0,12	0,48	0,0003	0,014	0,008	0,10	0,22	89,10
2C	0,11	0,41	0,0003	0,013	0,009	0,11	0,19	89,15

- Ponto 3

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
3A	0,13	0,46	0,0004	0,014	0,016	0,12	0,22	96,05
3B	0,13	0,53	0,0003	0,013	0,013	0,12	0,25	94,67
3C	0,12	0,51	0,0004	0,014	0,013	0,10	0,20	96,83

- Ponto 4

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
4A	0,11	0,45	0,0006	0,013	0,013	0,10	0,20	87,10
4B	0,10	0,44	0,0005	0,013	0,013	0,10	0,21	88,30
4C	0,11	0,43	0,0004	0,012	0,009	0,09	0,22	86,73

- Ponto 5

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
5A	0,11	0,41	0,0005	0,013	0,011	0,12	0,19	83,82
5B	0,10	0,42	0,0003	0,012	0,010	0,11	0,20	84,52
5C	0,12	0,43	0,0004	0,014	0,012	0,12	0,19	84,31

- Ponto 6

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
6A	0,11	0,43	0,0004	0,013	0,009	0,11	0,19	87,41
6B	0,10	0,44	0,0006	0,012	0,013	0,11	0,20	87,80
6C	0,10	0,41	0,0006	0,011	0,012	0,12	0,19	84,87

- Ponto 7

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
7A	0,10	0,37	0,0003	0,011	0,017	0,11	0,18	81,15
7B	0,11	0,44	0,0004	0,011	0,010	0,12	0,19	79,43
7C	0,10	0,40	0,0003	0,011	0,017	0,11	0,18	79,10

- Ponto 8

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
8A	0,08	0,34	0,0002	0,010	0,007	0,09	0,17	74,80
8B	0,09	0,39	0,0003	0,010	0,008	0,09	0,15	71,90
8C	0,09	0,37	0,0002	0,009	0,006	0,10	0,17	69,65

- Ponto 9

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
9A	0,46	0,44	0,0005	0,012	0,017	0,12	0,20	86,40
9B	0,52	0,49	0,0004	0,013	0,013	0,12	0,20	89,00
9C	0,53	0,46	0,0004	0,012	0,014	0,11	0,21	90,64

- Ponto 10 (Controle)

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
10A	0,38	0,40	0,0003	0,011	0,008	0,10	0,18	77,19
10B	0,35	0,37	0,0004	0,012	0,010	0,11	0,17	76,98
10C	0,37	0,38	0,0003	0,011	0,008	0,10	0,18	77,31

- Ponto 11

Amostra	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	Cr	Mo	Fe
11A	0,17	0,42	0,0004	0,012	0,011	0,11	0,19	81,90
11B	0,17	0,41	0,0005	0,011	0,010	0,11	0,18	82,80
11C	0,16	0,41	0,0004	0,011	0,011	0,11	0,19	82,01

Fonte: Autora (2025), a partir de dados de ICP-OES – UTFPR Câmpus Medianeira.