



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (IGEO)

DEPARTAMENTO DE MINERALOGIA E PETROLOGIA (DEMIPE)

João Gomes Ilha

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL EM DUAS DRENAGENS NA
REGIÃO DE CANDIOTA, RS.

Porto Alegre

2019

JOÃO GOMES ILHA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL EM DUAS DRENAGENS NA
REGIÃO DE CANDIOTA, RS.

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Prof^a. Dr^a. Maria Lídia
Medeiros Vignol e Prof. Dr. Norberto Dani

Porto Alegre

2019

CIP - Catalogação na Publicação

Ilha, João Gomes
Avaliação do Impacto Ambiental em Duas Drenagens na
Região de Candiota / João Gomes Ilha. -- 2019.
155 f.
Orientadores: Maria Lídia Medeiros Vignol, Norberto
Dani.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2019.

1. Geoquímica. 2. Contaminação. 3. Carvão. 4.
Metais Pesados. 5. Candiota. I. Vignol, Maria Lídia
Medeiros, orient. II. Dani, Norberto, orient. III.
Título.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Geociências
Departamento de Mineralogia e Petrologia
Curso de Graduação em Geologia

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL EM DUAS DRENAGENS NA REGIÃO DE CANDIOTA, RS.**” elaborado por “**JOÃO GOMES ILHA**”, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Baitelli

Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato

Profa. Dra. Franciéle Schwanck

PORTO ALEGRE, DEZEMBRO DE 2019

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos desse trabalho vão primeiramente a todas as pessoas que um dia lutaram, ainda lutam ou vão lutar pela educação pública, gratuita e de qualidade, pela ciência de qualidade, pela cultura de acesso universal, pelo meio ambiente e pela liberdade de expressão e soberania dos mais diversos povos. À comunidade que desenvolve softwares livres, ferramentas importantes na universalização do conhecimento técnico-científico e que muito me ajudou nesse trabalho.

Agradeço imensamente à Manoela (peipi) que sempre foi muito importante e me ajuda emocional e tecnicamente há tantos anos, obrigado pelo amor, carinho e tempo dedicados a mim. Ao meu mentor de Excel e grande amigo Léo que me ajudou tantas vezes. À minha consultora de inglês e também grande amiga Marinoca. A todos os meus grandes amigos do colégio que de uma forma ou de outra sempre estiveram me ajudando há tantos anos, desde a infância. Aos grandes amigos que fiz na geologia e que durante o curso me acompanharam nos bons e maus momentos, nas lutas estudantis, no CAEG, nos trabalhos de campo. À equipe do Climb pelos treinos e viagens maravilhosas que me ajudaram a esquecer por um tempo das preocupações diárias. Enfim, agradeço a todos os meus grandes amigos, não citarei nomes para não alongar o texto, mas todos vocês foram de grande importância pra mim, podem ter certeza!!

Agradeço aos meus orientadores e colegas por se esforçarem tanto e terem coragem para desenvolver a geologia ambiental num curso que prioriza tantas outras coisas que não o entendimento do meio ambiente inserido no contexto atual de globalização dos impactos antrópicos. Em especial à Lídia, por ter me orientado por tantos anos e desenvolver a geologia ambiental na UFRGS, ao Dani por ter lutado contra o senso comum e ter desenvolvido metodologias de análise ambiental e ao Rualdo, professor que sempre me inspirou desde muito antes de eu entrar na geologia e que me apresentou indiretamente a ela por meio do seu Atlas Ambiental, quando eu era apenas uma criança curiosa pela natureza. Ao pessoal dos laboratórios que utilizei e que sempre me apoiaram durante o árduo processo de preparação das análises.

Agradeço à CRM e à CGTEE pela disponibilização do seu tempo para conversas, pela disponibilização de dados e por liberarem a entrada da nossa equipe no espaço. Aos motoristas concursados do Instituto de Geociências por serem tão eficientes, gentis e profissionais no seu trabalho que corre em direção à extinção.

Agradeço imensamente à minha família por me incentivar desde cedo quando descobri que era apaixonado pela geologia e por me darem todo o suporte que deram durante esses anos de graduação e seguramente nos anos que virão. Sem o carinho e o amor de vocês teria sido muito mais difícil lidar com esse processo.

*“Tentei não fazer nada na vida que
envergonhasse a criança que fui.”*

José Saramago

RESUMO

A região do município de Candiota, no Sudeste no Rio Grande do Sul, tem exploração de carvão há muitos anos. A contaminação no entorno já foi documentada e necessita de constante atualização. Neste trabalho, foram escolhidos dois arroios para o estudo das condições ambientais dos seus sedimentos de fundo e de suspensão: o Arroio Candiota, próximo à termelétrica movida a carvão, e o Arroio Poacá, próximo à mina de carvão Mina Candiota. Para avaliar as condições ambientais dos arroios foram utilizadas as técnicas de separação granulométrica, difratometria de raios-X, espectrometria de fluorescência de raios-X, a aplicação de índices geoquímicos e a comparação com normativas existentes. No Arroio Candiota os sedimentos transportados são classificados na sua maioria como seixos, depois areia e por último silte e argila. Foram observadas ações antrópicas que mudaram a hidrodinâmica fluvial em um ponto, favorecendo a deposição de sedimentos finos. Este mesmo arroio apresenta como mineralogia principal os minerais esmectita, mica, caulinita, quartzo e feldspato. Num dos pontos foi detectada a presença dos minerais talco e calcita que foi confirmada pela maior concentração de Mg e Ca na análise química. Estas demonstraram que o arroio apresenta concentrações de Ba e Zn acima dos limites e que diversos outros elementos estão em concentrações que precisam ser monitoradas. O Ba é identificado tanto nos sedimentos de fundo, como nos sedimentos de suspensão, enquanto o Zn ocorre apenas nos sedimentos de suspensão. Nos sedimentos em suspensão sobressai-se o cádmio. Os índices geoquímicos indicam um grande enriquecimento em cálcio e magnésio. No Arroio Poacá a análise granulométrica apontou preferencialmente a existência de sedimentos na fração areia com silte e argila em menor quantidade e pouco, ou quase nada, de seixos. A mineralogia principal indicou a ocorrência de esmectita, mica, caulinita, quartzo e feldspato. No entanto, a análise da fração argila indicou que a maioria dos pontos amostrados contém apenas caulinita. As análises químicas apontaram no arroio a presença de arsênio, bário, cobre e zinco. A presença do arsênio é mais destacada nos sedimentos de fundo, enquanto as concentrações de cobre e zinco têm preferência pelos sedimentos de suspensão. O bário contamina os sedimentos de suspensão, mas também está com concentrações altas nos sedimentos de fundo. Concentrações altas de vanádio, porém não acima do limite, foram medidas nos sedimentos de fundo. O cádmio também está em concentrações consideradas preocupantes nos sedimentos de suspensão, porém sem ultrapassar o limite normativo. Os índices geoquímicos para o Arroio Poacá apontaram um intenso enriquecimento em enxofre e ferro.

Palavras-chave: geoquímica, contaminação, carvão, metais pesados, Candiota.

ABSTRACT

The Candiota County region, southeast of Rio Grande do Sul, has been coal mined for a long time. The contamination in the area has already been documented and needs to be constantly updated. In this study, two rivers have been chosen in order to evaluate the environmental conditions of their bottom sediments and suspension sediments: the Candiota River near the coal fired thermoelectric and the Poacá River near to the coal mina Mina Candiota. In order to assess rivers environmental conditions, granulometric techniques, X-ray diffractometry and X-ray fluorescence spectrometry were used combined to the application of geochemical indexes and the comparison with existing normatives. At the Candiota River, the transported sediments were classified mostly as gravels, then sand and lastly silt and clay. Anthropogenic actions that changed the rivers hydrodynamics favoring fine grained sediment deposition have been observed. This same river presents as its main mineralogy smectite, mica, kaolinite, quartz and feldspar. At one sampling point the presence of talc and calcite was identified and later confirmed by the higher concentration of magnesium and calcium in the chemical analysis. The chemical analysis also showed that the river contains high concentrations of Ba and Zn, above the normative limit, and that many other elements have concentrations that must be closely monitored. The Barium is identified in the bottom and suspension sediments meanwhile the Zn occurs only in the suspension sediments. In the suspension sediments also stands out the concentration of Cd. Geochemical indexes indicated a great Ca and Mg enrichment. At the Poacá River, granulometric assessment indicated the preference for sandy sediments with lower silt and clay sediments and almost no occurrence of gravels. The main mineralogy is composed by smectite, mica, kaolinite, quartz and feldspar. However the clay fraction analysis showed that the majority of the sampling points contains only kaolinite. The chemical analysis pointed out the presence of arsenic, barium, copper and zinc. The presence of As is most outstanding in the bottom sediments, whilst copper and zinc occurs in the suspension sediments. The Ba contamination appears in the suspension sediments but it also has high concentration values in the bottom sediments. High V concentrations, although not above the limit, were measured in the bottom sediments. Cd also has concerningly high concentration in the suspension sediments but without overtaking the normative limits. Poacá River's geochemical indexes indicated intense enrichment in sulfur and iron.

Key-words: geochemistry, contamination, coal, heavy metals, Candiota.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carvão mineral (Foto: Seival Sul Mineração).....	20
Figura 2: Matriz energética brasileira. (Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2016).	22
Figura 3: À esquerda, mapa do Rio Grande do Sul com a localização do município de Candiota destacado. À direita mapa de detalhe do município de Candiota com a localização da mineração e da usina termelétrica.....	23
Figura 4: Mapa de localização do Município de Candiota e rede de estradas para acesso (dados disponibilizados por CPRM, 2015).	32
Figura 5: Mapa geológico simplificado da região de estudo. Confeccionado a partir de dados dos mapeamentos das folhas Hulha Negra (SH-22-Y-C-I) e Passo São Diogo (SH-22-Y-C-IV) realizado por CPRM na escala 1: 100.000. A linha preta representa o contorno do município de Candiota.....	35
Figura 6: Coluna estratigráfica da região da Mina Candiota (modificado de De Matos et al. 2017).	36
Figura 7: Em A, frente de lavra na Mina Candiota. Em B, testemunho de sondagem de Área da Mina Candiota, cedido pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM).	37
Figura 8: Mapa de localização das bacias hidrográficas e os principais rios que compõem a região (base de dados disponibilizada pelo Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO) do Centro de Ecologia da UFRGS).	39
Figura 9: Gráfico confeccionado a partir de dados históricos da Estação Meteorológica de Bagé obtidos durante 58 anos e disponibilizados pela rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).	40
Figura 10: Gráfico em pizza das porcentagens das direções preferenciais dos ventos. O resultado de 0% representa a classe “Sem Informação”, enquanto a classe C é a considerada de calmaria de ventos.	46
Figura 11: Mapa de influência dos ventos confeccionado com base cartográfica disponibilizada por CPRM (2015) e com dados climáticos tratados a partir de dados brutos disponibilizados pelo INMET.	46
Figura 12: Mapa da rede de drenagens da região do estudo confeccionado a partir de base cartográfica e hidrográfica disponibilizada por CPRM na escala 1:100.000 (2015).	48
Figura 13: Litologias e drenagens da região. Mapa confeccionado a partir de base cartográfica e dados geológicos disponibilizados por CPRM (2013 e 2015). A rede de drenagem apresentada é uma simplificação da realidade.	48
Figura 14: Mapa de uso do solo voltado para a mineração, termelétrica, aterro sanitário e principais áreas urbanizadas. Mapa confeccionado a partir de base cartográfica disponibilizada por CPRM (2015) e imagens de satélite disponibilizadas pela Google Satellite.	49

Figura 15: Em A, mapa de localização geral dos pontos de amostragem. Em B, mapa de localização dos pontos de amostragem e do background comparados à localização da Formação Rio Bonito e aos quadrantes de influência do vento.	51
Figura 16: Mapa de localização dos arroios escolhidos para o estudo. Confeccionado a partir de base cartográfica e hidrográfica disponibilizada por CPRM (2015).....	52
Figura 17: Em A, coleta de amostra no ponto branco utilizando pá. Em B, coleta de amostra utilizando Draga Van Veen. Em C, coleta de amostra utilizando macacão impermeável para entrar no arroio. Em D, coleta de amostra utilizando pá.	54
Figura 18: Pedaco de carvão identificado na barra de acreção lateral do rio correspondente ao ponto branco.....	55
Figura 19: Procedimento de coleta de sedimento em suspensão e filtragem.	56
Figura 20: Arroio Sanga Funda no Ponto 1 (considerado background).	57
Figura 21: Coleta de amostra de sedimento de fundo no Ponto 2.	58
Figura 22: Coleta de amostra de sedimento de fundo para análise granulométrica no Ponto 2.....	59
Figura 23: Coleta de amostras no ponto 4.	59
Figura 24: Drenagem no Arroio Poacá, ponto 5.....	60
Figura 25: Coleta de amostra de sedimento em suspensão no Arroio Carvoeira, afluente do Arroio Poacá.....	61
Figura 26: Ponto 7 no Arroio Poacá, a jusante da mineração de carvão da Mina Candiota.....	61
Figura 27: Fluxograma do processo de análise dos materiais.	62
Figura 28: Processo pós pesagem das amostras e suas respectivas fichas laboratoriais.....	63
Figura 29: Preparação das amostras para análise granulométrica. Processo de decantação do silte e pipetagem da argila.	64
Figura 30: Amostra peneirada sendo desagregada utilizando gral e pistilo de ágata.	66
Figura 31: Em A, o processo de orbitação. Em B, cada uma das amostras passando pelo processo de decantação. Em C, o processo de pipetagem. Em D, o resultado em tempo real da análise.	68
Figura 32: Em A, pastilha prensada. Em B mistura da amostra com ácido bórico cristalino (branco) para preparação da pastilha prensada. Em C, pastilhas fundidas.	70
Figura 33: Dados de granulometria para os pontos 01, 02 e 03. Os valores indicados nas barras dos histogramas correspondem aos teores em porcentagem das respectivas frações granulométricas.	77
Figura 34: Difrátogramas de RT dos pontos representativos do Arroio Sanga Funda (PT – 01) e Candiota (PT – 02 e PT – 03).....	79
Figura 35: Difrátograma de amostra orientada do PT – 01.	80
Figura 36: Difrátograma de amostra orientada do PT – 02.	81
Figura 37: Difrátograma de amostra orientada do PT – 03.	81

Figura 38: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos maiores do Arroio Candiota (referência PT – 01).....	84
Figura 39: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos menores e traços do sedimento de fundo do Arroio Candiota.	89
Figura 40: Concentração dos elementos Mn, Fe, Ba, Zn, Cr, Rb, Pb, Y e V nos sedimentos de suspensão do Arroio Candiota.	94
Figura 41: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos menores e traços do sedimento de suspensão do Arroio Candiota.	98
Figura 42: Dados de granulometria para os pontos 04, 05, 06 e 07.....	100
Figura 43: Difractogramas interpretados das amostras analisadas pela metodologia de rocha total do Arroio Poacá.	102
Figura 44: Difractograma interpretado do PT – 04 analisado pela técnica de amostra orientada.	104
Figura 45: Difractograma interpretado do PT – 05 analisado pela técnica de amostra orientada.	105
Figura 46: Difractograma interpretado do PT – 06 analisado pela técnica de amostra orientada.	105
Figura 47: Difractograma interpretado do PT – 07 analisado pela técnica de amostra orientada.	106
Figura 48: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos menores e traços do sedimento de fundo do Arroio Poacá.....	112
Figura 49: Gráficos dos resultados do fator de enriquecimento e do fator de contaminação para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão do Arroio Poacá. Parte 1.	122
Figura 50: Gráficos dos resultados para o fator de enriquecimento, fator de contaminação e índice de geoacumulação para os sedimentos de suspensão do Arroio Poacá. Parte 2.....	123
Figura 51: Comparação das distribuições granulométricas, em porcentagem (%), de acordo com o ponto e arroio nos quais foram coletadas as amostras.	124
Figura 52: Variação das concentrações de elementos maiores nos arroios estudados.	128
Figura 53: Concentração de sílica (SiO ₂) nos sedimentos de fundo ao longo das drenagens.	129
Figura 54: Concentração de ferro (Fe ₂ O ₃) nos sedimentos de fundo vs sedimento de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.	129
Figura 55: Concentração de enxofre nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.	130
Figura 56: Concentração dos elementos Cr e As nos sedimentos de fundo e de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.	131

Figura 57: Concentração do cádmio nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.	132
Figura 58: Concentração do bário nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.	133
Figura 59: Concentração do zinco nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.	134
Figura 60: Distribuição das contaminações de acordo com a Nova Lista Holandesa.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fontes das contaminações por metal pesado nos solos mundiais anualmente (1000 t/ano). Modificado de Nriagu e Pacyna (1988).	29
Tabela 2: Tabela de dados históricos das médias mensais das precipitações e temperatura ao longo de 58 anos. Utilizados para a confecção da Figura 9.....	41
Tabela 3: Exemplo do significado de alguns dos 37 códigos de vento disponibilizados pelo INMET.	43
Tabela 4: Tabela elaborada com os dados brutos (colunas A, B, C, D e E) e dados tratados (coluna F).	44
Tabela 5: Frequência de ocorrência dos ventos e porcentagem.....	45
Tabela 6: Tabela de conteúdo de sedimentos finos em gramas e porcentagem para cada ponto de amostragem do Arroio Candiota e Sanga Funda.....	78
Tabela 7: Concentração dos elementos maiores nos sedimentos de fundo do Arroio Candiota. Nd = não detectado. LOI = Perda ao Fogo (Loss of Ignition). Os teores dos elementos são expressos em porcentagem (%) de óxidos.	82
Tabela 8: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos 02 e 03.	83
Tabela 9: Concentração dos elementos menores e traços em ppm nos pontos amostrados dos sedimentos de fundo do Arroio Candiota.....	87
Tabela 10: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de fundo dos pontos 02 e 03.	88
Tabela 11: Concentração dos elementos menores e traços em ppm nos pontos amostrados dos sedimentos de suspensão do Arroio Candiota.....	93
Tabela 12: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de suspensão dos pontos 02 e 03.....	95
Tabela 13: Tabela de conteúdo de sedimentos finos em gramas e porcentagem para cada ponto de amostragem do Arroio Poacá.	101
Tabela 14: Concentração dos elementos maiores nos sedimentos de fundo do Arroio Poacá. Nd = não detectado. LOI = Perda ao Fogo (Loss of Ignition).....	108
Tabela 15: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos 04, 05, 06 e 07.....	108
Tabela 16: Concentração dos elementos menores e traços nos sedimentos de fundo do Arroio Poacá.....	110
Tabela 17: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de fundo dos pontos 04, 05, 06 e 07.	111
Tabela 18: Concentração dos elementos menores e traços em ppm nos pontos amostrados dos sedimentos de suspensão do Arroio Poacá.....	116
Tabela 19: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de suspensão dos pontos 04, 05, 06 e 07.....	117
Tabela 20: Dados secundários de pH para o Arroio Poacá e Candiota.	127

Tabela 21: Comparação entre a química do carvão e de suas cinzas com a média encontrada em cada um dos materiais analisados em cada um dos arroios. Os resultados estão em ppm. Os dados químicos do carvão, das cinzas leves e das cinzas pesadas foram retirados de Pires et al. 2001.....	132
Tabela 22: Comparação das concentrações obtidas no presente estudo com os valores indicados pela normativa da Nova Lista Holandesa.	135
Tabela 23: Valores de referência para limites de concentração de metais em solos	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classes de divisão para o Fator de Enriquecimento, segundo Birth (2003) apud Chen et al. (2007).....	73
Quadro 2: Classes propostas por Hakanson (1980) e as qualidades dos sedimentos em relação à contaminação.	74
Quadro 3: Classificação do Igeo e dos níveis de contaminação segundo Muller et al. (1981).....	75
Quadro 4: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos representantes do Arroio Candiota.	86
Quadro 5: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos representantes do Arroio Candiota Parte 1....	91
Quadro 6: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos representantes do Arroio Candiota Parte 2....	92
Quadro 7: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos representantes do Arroio Candiota Parte 1.	96
Quadro 8: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos representantes do Arroio Candiota Parte 2.	97
Quadro 9: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos representantes do Arroio Poacá.	109
Quadro 10: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos 04 e 05 do Arroio Poacá.....	114
Quadro 11: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos 06 e 07 do Arroio Poacá.....	115
Quadro 12: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 04 e 05. Parte 1.	118
Quadro 13: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 04 e 05. Parte 2.	119
Quadro 14: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 06 e 07. Parte 1.	120

Quadro 15: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 06 e 07. Parte 2.	121
Quadro 16: Tabela representando a ocorrência mineral em cada amostra detectada pela DRX utilizando a metodologia de Rocha Total na fração menor do que 60 µm.	125
Quadro 17: Tabela de ocorrência mineral na fração menor do que 4 µm nas amostras analisadas pelo método de Amostra Orientada.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

BIF – *Banded Iron Formation*

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CGTEE – Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPGq – Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica

CPRM – Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais

CRM – Companhia Riograndense de Mineração

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX – Difractometria de Raios-X

EPA – *Environmental Protection Agency*

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

FC – Fator de Contaminação

FE – Fator de Enriquecimento

FRX – Espectrometria de Fluorescência de Raios – X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia

ICP – *Inductively Coupled Plasma*

Igeo – Índice de Geoacumulação

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

Ma – Milhões de anos

MDF – *Medium Density Fiberboard*

MST – Movimento do Trabalhadores Rurais Sem Terra

MW – Mega Watts

OMS – Organização Mundial da Saúde

RT – Rocha Total

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

TTG – Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito

ZCDC – Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Graus Celsius

Å – ångström

keV – Kilo Eletron Volt

kV – Kilo Volt

mA – miliampere

mm – Milímetros

ppm – Partes por Milhão

µm – Micrômetros

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	JUSTIFICATIVA.....	25
3	OBJETIVOS.....	25
3.1	Objetivos Gerais.....	25
3.2	Objetivos Específicos.....	25
4	O PROBLEMA DO CARVÃO.....	26
4.1	Histórico Mundial e no Brasil.....	26
4.2	Metais Pesados.....	27
4.3	Histórico de Candiota.....	30
5	ÁREA DE ESTUDO.....	31
5.1	Caracterização da Área.....	31
5.2	Aspectos da Fisiografia Local.....	32
5.2.1	Geologia.....	32
5.2.1.1	Geologia Regional.....	32
5.2.1.2	Geologia Local.....	35
5.2.2	Geomorfologia.....	38
5.2.3	Hidrografia.....	38
5.2.4	Clima.....	40
6	METODOLOGIA.....	42
6.1	Pré-Campo.....	42
6.1.1	Análise Climática.....	42
6.1.2	Análise de Terreno.....	47
6.1.3	Análise do Uso do Terreno.....	49
6.1.4	Análise de Acessibilidade.....	50
6.1.5	Escolha dos Pontos de Amostragem e <i>Background</i>	50
6.1.6	Preparação do Material para o Trabalho de Campo.....	53
6.2	Trabalho de Campo.....	53
6.2.1	Coleta de Amostras.....	53
6.2.1.1	Sedimentos de Fundo.....	53
6.2.1.2	Sedimento em Suspensão.....	55
6.2.2	Pontos de Amostragem.....	57
6.2.2.1	Ponto 1 ou <i>Background</i>	57

6.2.2.2	Ponto 2.....	57
6.2.2.3	Ponto 3.....	58
6.2.2.4	Ponto 4.....	59
6.2.2.5	Ponto 5.....	60
6.2.2.6	Ponto 6.....	60
6.2.2.7	Ponto 7.....	61
6.3	Preparação das Amostras.....	62
6.3.1	Granulometria.....	62
6.3.2	Análise Mineralógica e Química	64
6.3.2.1	Difratometria de Raios-X (DRX)	66
6.3.2.2	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)	69
6.4	Tratamento Estatístico dos Dados	71
6.4.1	Fator de Enriquecimento (FE)	71
6.4.2	Fator de Contaminação (FC)	73
6.4.3	Índice de Geoacumulação (Igeo).....	74
7	RESULTADOS.....	76
7.1	Arroio Candiota	76
7.1.1	Granulometria.....	76
7.1.2	Mineralogia – DRX.....	78
7.1.2.1	Rocha Total (RT).....	78
7.1.2.2	Amostra Orientada (fração <4 µm).....	80
7.1.3	Geoquímica – FRX	82
7.1.3.1	Sedimentos de Fundo	82
7.1.3.2	Sedimentos de Suspensão	93
7.2	Arroio Poacá	99
7.2.1	Granulometria.....	99
7.2.2	Mineralogia – DRX.....	101
7.2.2.1	Rocha Total (RT).....	101
7.2.2.2	Amostra Orientada	103
7.2.3	Geoquímica – FRX	106
7.2.3.1	Sedimentos de Fundo	106
7.2.3.2	Sedimentos de Suspensão	116
8	DISCUSSÕES.....	124

9	CONCLUSÕES	139
10	REFERÊNCIAS	141
11	ANEXOS.....	147
11.1	Anexo I: Tabelas de granulometria	147
11.2	Anexo II: Difractogramas de amostra orientada sem separação da fração menor do que 4 μm	149
11.3	Anexo III: Desvio padrão da leitura dos elementos na FRX.....	154

1 INTRODUÇÃO.

O carvão mineral (Figura 1) é um dos mais antigos combustíveis fósseis utilizados pela sociedade, tendo registros de mais de 2000 anos na atividade humana (Teixeira *et al.* 2001). No entanto, foi com a revolução industrial que o bem mineral passou a ser amplamente requisitado e utilizado para geração de energia. No Brasil, o carvão foi descoberto no início do século XIX. Existem diversas histórias para explicar o primeiro contato, desde tropeiros que utilizaram o carvão para acender uma fogueira, até explicações que remontam às construções das primeiras ferrovias no sul do Brasil por técnicos ingleses. Embora haja o conhecimento da existência de tal recurso mineral há muito tempo no Brasil, foi apenas durante a II Guerra Mundial que o recurso foi explorado amplamente, como forma do país se tornar independente dos recursos internacionais e garantir a soberania nacional (Teixeira *et al.* 2001).



Figura 1: Carvão mineral (Foto: Seival Sul Mineração).

O carvão mineral se forma a partir de matéria orgânica vegetal compactada em ambiente anaeróbico (Teixeira *et al.* 2001). Portanto, é uma rocha sedimentar. Em geral está associado a ambientes lagunares rasos. A partir do início da sua compactação e com crescente temperatura, os elementos voláteis que podem estar associados são gradualmente expelidos, promovendo a concentração do carbono e progressiva formação de minerais a partir dos quais pode-se classificar o carvão como turfa, linhito, carvão betuminoso e antracito sendo este o de mais alto grau de

1 – INTRODUÇÃO

maturação (Teixeira *et al.* 2001). Ainda, segundo o mesmo autor, pode-se classificar o carvão por meio da origem da sua matéria vegetal, podendo ser húmico quando a massa vegetal constituinte do carvão provém de ambientes continentais ou paludais, sapropélico ou saprotético quando a massa vegetal provém de algas marinhas.

No Brasil, o carvão mineral é classificado como húmico. Segundo Teixeira *et al.* (2001), o carvão brasileiro provém de uma paleoflora carbonífera – permiana que compunha a vegetação do paleocontinente Gondwana. Ainda segundo Teixeira *et al.* (2001), as principais fontes para a massa vegetal que deu origem ao carvão brasileiro eram pteridófitas (como samambaias), gimnospermas, licófitas e estenófitas, estas duas últimas extintas. Portanto, os carvões explorados no Rio Grande do Sul são de idade permiana inferior, com cerca de 260 Ma (Teixeira *et al.* 2001).

O carvão mineral é o recurso energético não renovável mais abundante do mundo e tem a maior perspectiva de duração dos seus depósitos, com 133 anos calculados de exploração, segundo DNPM (2017). É responsável pela geração de aproximadamente 38,4% da eletricidade mundial (DNPM, 2001).

No Brasil, as reservas chegam a ter 17 bilhões de toneladas, das quais 6,6 bilhões de toneladas são lavráveis (DNPM, 2017). Segundo estimativas da *BP Statistical Review of World Energy 2008*, esse montante corresponde a aproximadamente 1% do total de reservas de carvão mineral dos países detentores dos maiores depósitos. Embora o volume seja expressivo a nível mundial, na matriz energética do Brasil, o carvão mineral participa com apenas 5,5% do total (Figura 2). Os estados que mais produzem o carvão são Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Quanto à qualidade, o carvão produzido é de baixo *rank*, sendo utilizados exclusivamente para produção de energia elétrica em termoelétricas (CEEE, Secretaria de Minas e Energia do RS, 2015).

1 – INTRODUÇÃO

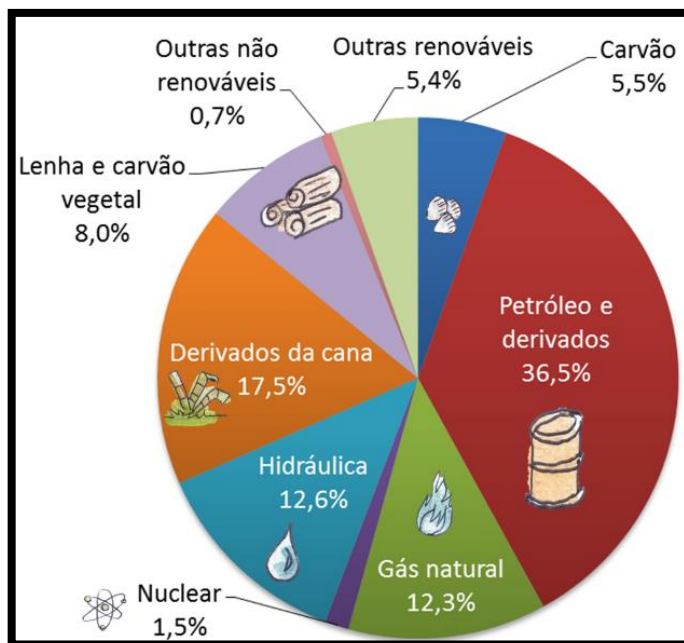


Figura 2: Matriz energética brasileira. (Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2016).

No Rio Grande do Sul estão cerca de 80% das reservas de carvão mineral do Brasil, dessas, 63% são lavráveis (Secretaria de Minas e Energia do RS, CEEE, 2015). Os principais municípios produtores de carvão mineral são Candiota, Arroio dos Ratos, Butiá, Minas do Leão e Cachoeira do Sul (DNPM, 2007). Dados da Companhia Riograndense de Mineração (CRM) apontam que a produção anual de carvão mineral, pela mina de Candiota, atingiu a marca de 3.300.000 toneladas no ano de 2010.

O presente trabalho tem como foco de estudo a região do município de Candiota, na campanha, sudoeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 3). Na área do município estão alocadas as minas de Candiota, responsáveis por cerca de 45% do carvão mineral bruto lavrável total do estado (CEEE, Secretaria de Minas e Energia do RS, 2015), e o complexo termelétrico Candiota. Além da Mina de Candiota, pertencente à CRM, na região está em processo de instalação a Mina Seival, pertencente à Seival Sul Mineração. A mina terá produção estimada de 2.800.000 toneladas por ano (Seival Sul Mineração, 2019) e abastecerá a Usina Termelétrica Pampa Sul que iniciou suas atividades em junho de 2019 (Jornal do Comércio, 2019).

1 – INTRODUÇÃO

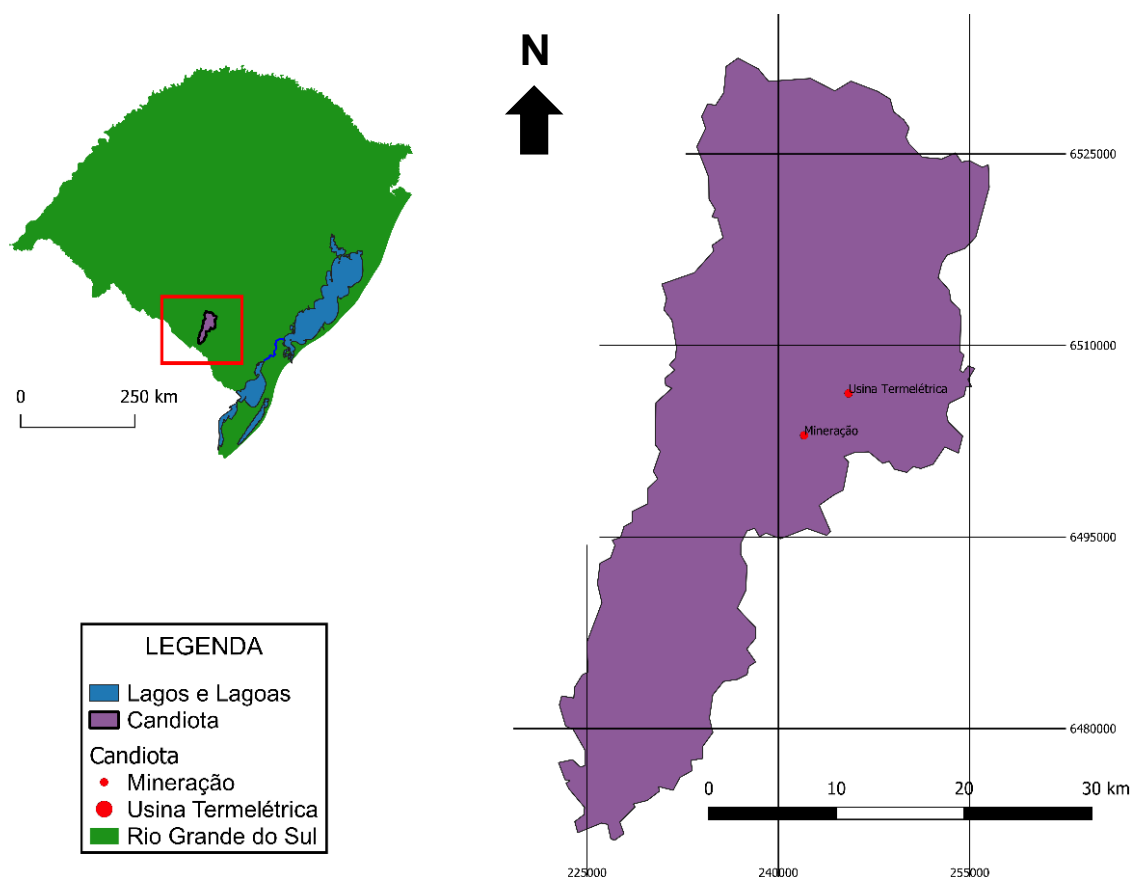


Figura 3: À esquerda, mapa do Rio Grande do Sul com a localização do município de Candiota destacado. À direita mapa de detalhe do município de Candiota com a localização da mineração e da usina termelétrica.

A Usina Termelétrica Presidente Médici (Candiota II) foi construída em duas fases, a Fase A com duas unidades, e que têm capacidade de produção de 63MW cada, entrou em operação em 1974 e a Fase B, com duas unidades que produzem 160MW cada, entrou em operação em 1986 (CGTEE, Eletrobrás). Junto com a usina de Candiota I, inaugurada em 1961, e Candiota III, inaugurada em 2011, faz parte do Complexo Termelétrico Candiota com capacidade de geração instalada de 796 MW, dos quais 350 MW provêm de Candiota III e 446MW de Candiota II (CGTEE, Eletrobrás).

Segundo dados disponibilizados pela Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - Eletrobras CGTEE, a queima do carvão nestas usinas gera de 52,2% a 59% de cinzas. Parte destas cinzas juntamente com demais produtos são lançadas para a atmosfera por meio de chaminés e se espalham pela região de acordo com o regime

1 – INTRODUÇÃO

de ventos e chuvas, com potencial para originar chuvas ácidas. A deposição deste material pode causar danos ao meio ambiente e, por consequência, à saúde humana. A deposição no solo, pode levar à formação de drenagens ácidas e a contaminação por metais, podendo afetar a fauna e a flora endêmicas, mas também dos cultivos da região. Segundo estudos, a composição de metais no carvão pode chegar a 1% (Flues, M. *et al.* 2008). Blume, H. P (1992) demonstrou que a contaminação por metais pesados em solos da Europa, decorrente da deposição atmosférica de cinzas finas provindas da queima de carvão mineral, tem aumentado. Segundo Morch, V. M. (1991), nas cinzas podem se acumular diversos elementos considerados tóxicos pela *Standard Methods for Examination of Water and Waste Water* (1995), tais como As, Cd e Pb.

Dentro desta perspectiva é importante que seja controlada e estudada a contaminação provinda das minas de carvão e da queima dele para geração de energia elétrica nas usinas termelétricas. Dentro das técnicas analíticas disponibilizadas, o projeto se dispõe a avaliar possíveis impactos nas drenagens da região de Candiota.

2 JUSTIFICATIVA

Frente à grande demanda por mais fontes de energia para suprir indústrias, população e exportação/importação de *commodities*, o carvão mineral voltou a ser uma opção considerada viável pelos governantes brasileiros. No Brasil, o carvão tem sido uma fonte secundária de geração energética e de energia elétrica. No entanto, o cenário pode estar mudando com o avanço dos investimentos nessa área e a expansão das minas e das usinas termelétricas.

De encontro a essa necessidade, surgem as demandas das comunidades que vivem no entorno das regiões carvoeiras. Desta maneira, foi levantado um pedido dos moradores locais ao Ministério Público para que investigasse a área em busca de elucidações quanto à qualidade ambiental. Assim, surge o projeto intitulado “Avaliação Dos Impactos Nos Últimos 50 Anos E Monitoramento Ambiental Dos Próximos Cinco Anos Na Região Carbonífera Do Sul Do Rio Grande Do Sul: Uma Proposta De Análise Integrada Do Ecossistema”, projeto no qual está inserido o presente estudo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos Gerais

A pesquisa tem o objetivo de investigar a qualidade dos sedimentos em suspensão e os sedimentos de corrente das drenagens adjacentes aos empreendimentos carvoeiros, em busca de quantificar e demonstrar se há contaminação e, caso positivo, as características desta contaminação.

3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar granulometria do material, mineralogia e geoquímica;
- Aplicar índices geoquímicos; e
- Comparar com normativas.

4 O PROBLEMA DO CARVÃO

4.1 Histórico Mundial e no Brasil

A poluição decorrente do carvão é mundialmente reconhecida há muito tempo. Segundo Brimblecombe (1975), em Londres, na década de 1250, já existiam indícios de queima de carvão junto com calcário para a produção de uma espécie de cimento utilizado na construção de castelos. Ainda segundo o mesmo autor, o uso do carvão para queima no lugar da madeira foi responsável por um dos primeiros registros de poluição com documentos oficiais exigindo uma reunião com as autoridades locais, por volta de 1285. De acordo com TE Brake (1975), durante o século XVII, Londres era uma cidade com muita poluição devido à queima do chamado “*Sea Coal*”, o carvão mineral trazido por embarcações para abastecer o reino. Há relatos inclusive de membros da Sociedade Real de Londres anotando em seus diários as invasões recorrentes de fumaça nos palácios e o aumento das doenças respiratórias na época.

Existem incontáveis trabalhos atuais sobre a contaminação dos solos, rios e atmosfera decorrentes da queima do carvão no mundo. Shi Gao Ling *et al.* (2013) demonstraram que moradores da zona rural da China próxima às minas de carvão chegam a consumir diariamente cinco vezes mais arsênio do que o permitido pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Pandey *et al.* (2015) demonstraram que em regiões próximas às minas de carvão de Jharia, na Índia, há contaminação por diversos elementos, sobretudo metais pesados.

No Brasil, pode-se dizer que o carvão é quase totalmente produzido na região sul, o estado com menos produção é o Paraná, Santa Catarina é segundo estado que mais produz, e as maiores minas e termelétricas estão no Rio Grande do Sul. Portanto, nestas regiões todo o cuidado e controle ambiental é necessário. Teixeira *et al.* (1997) afirmam que, em sedimentos de corrente de rios em áreas carvoeiras e com indústria de aço, no Rio Grande do Sul, há contaminação antropogênica por metais como Fe, Mn, Co, Cu, Cr, Ni e Pb. Ainda, os autores afirmam que essa contaminação deve estar ligada à presença de sulfetos, como a pirita, mineral abundante no carvão.

4 – O PROBLEMA DO CARVÃO

No Rio Grande do Sul, diversos estudos já apontam para a contaminação de mananciais devido à atividade carvoeira e indústria do aço (Baisch, 1994; Morsch, 1991; Zanardi Jr., 1990) e, inclusive, com relatos de impacto na saúde humana, como é o caso da população de Charqueadas e Butiá (Andrade, 1989). As duas grandes regiões carvoeiras a serem consideradas são a região do Baixo Jacuí, que engloba cidades como Charqueadas, Butiá e Arroio dos Ratos, e a região de Candiota. Nestas duas localidades carvoeiras, já foram registradas contaminações aquáticas gerando baixos valores de pH nos arroios que escoam a região (Jablonski, Teixeira e Pestana, 1997). No entanto, não há apenas redução do pH, Teixeira *et al.* (1997) demonstram que a contaminação de Co, Pb e Cu existe nos sedimentos no baixo Jacuí e estão junto com o Fe ligados à contaminação pela mineração de carvão. No mesmo trabalho, os autores caracterizam a pirita como sendo a principal hospedeira destes elementos, liberando-os ao meio aquoso quando lixiviada.

Além da atividade da mineração, outro grande problema de impacto ambiental relacionado à atividade carvoeira são as usinas termelétricas, responsáveis pela queima e geração de milhares de toneladas de cinzas, potenciais contaminantes, todos os dias. Um trabalho realizado por Jablonski, Teixeira, e Pestana (1997) demonstra que os metais contaminantes têm a tendência de volatilizar durante o processo da queima do carvão e que, sendo assim, podem ser carregados pelas cinzas e expelidos para a atmosfera, sendo posteriormente depositados nos solos e então drenados pelos arroios e rios.

Observa-se, portanto, a necessidade de estudos em relação às contaminações relacionadas ao carvão. Sendo as contaminações praticamente inerentes à atividade carvoeira e com registros históricos de que há séculos seu uso causa problemas ao meio ambiente e à saúde humana, é de suma importância o detalhamento das regiões onde estão instaladas tais atividades.

4.2 Metais Pesados

Um dos principais problemas decorrentes da mineração e do uso do carvão mineral é a contaminação por metais pesados. A estocagem do rejeito da mineração

4 – O PROBLEMA DO CARVÃO

de carvão é responsável pela liberação de metais pesados aos solos e aquíferos subjacentes. Como citado acima, o problema da contaminação não diz respeito apenas à atividade mineira, a queima do carvão pelas usinas termelétricas também tem grande impacto no meio ambiente (Tabela 1) podendo gerar plumas de contaminação muito extensas e de fácil dispersão. Morch (1991) aponta que nas cinzas podem estar presentes elementos nocivos e tóxicos à saúde humana, tais como As, Pb e Cd.

O estudo da contaminação de mananciais, solos e ar decorrentes de atividade antrópica já vem ocorrendo há algumas décadas em todo o mundo. Uma das problemáticas mais preocupantes para a saúde do ecossistema e, portanto, da saúde humana, é a água. Os rios não só desempenham o papel de dessedentação humana, vegetal e animal, como também são utilizados para diversas atividades antrópicas, sejam elas agrícolas até industriais. Deste modo, a análise de tais ambientes naturais se torna urgente, sobretudo naquelas regiões de intensa industrialização e ocupação por atividades possivelmente contaminantes. Há diversos estudos, há vários anos, salientando a problemática da contaminação em mananciais por metais pesados (Shimp *et al.* 1971 ; Cooper e Harris, 1974 ; Lee, 1975 ; Meittinen, 1975 ; Rolf e Jennet, 1975 ; Roy e Crawford 1984).

Desde o início do século passado, o fluxo de metais pesados, como Zn, Pb e Cd, de origem antropogênica em sedimentos fluviais, lacustres e estuarinos aumentou em grande quantidade. De acordo com pesquisas, é possível identificar o pico de fluxo do Pb e do Cd no início da década de 1970 e do Zn já chegando ao final da década de 1970 (Dominik *et al.* 1983). Sanstsch (1984) calculou, usando radioisótopos, que a taxa de acumulação de Pb e Cu, em uma baía nos Estados Unidos da América, era de três a quatro vezes maior no momento de intensa atividade carvoeira do que era quando a atividade havia cessado. Afirma também que tal contaminação ainda é evidente nas análises de sedimentos mesmo tendo passado um século entre a atividade carvoeira e o estudo. Geralmente, as variações de concentrações de metais traços no meio são atribuídas a diversos fatores como tamanho de partícula, mineralogia e conteúdo de matéria orgânica. No entanto, Armannsson *et al.* (1985), quando analisaram sedimentos do manancial Southampton Water, na Inglaterra, perceberam que a variação nas concentrações dos metais traços que podem ser contaminantes, como Zn, Pb e Cu não tinham relação clara com estes fatores. Fato

4 – O PROBLEMA DO CARVÃO

este que torna o estudo e o entendimento da dispersão de contaminantes um tanto complicado devido ao grande número de variáveis que estão envolvidas na mobilização, solubilização e carregamento destes elementos.

Tabela 1: Fontes das contaminações por metal pesado nos solos mundiais anualmente (1000 t/ano). Modificado de Nriagu e Pacyna (1988).

Fontes	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Agricultura e resíduos alimentares	0~0.6	0~0.3	4.5~90	3~38	0~1.5	6~45	1.5~27	12~150
Esterco	1.2~4.4	0.2~1.2	10~60	14~80	0~0.2	3~36	3.2~20	150~320
Desmatamento e resíduo da indústria madeira	0~3.3	0~2.2	2.2~18	3.3~52	0~2.2	2.2~23	6.6~8.2	13~65
Resíduos municipais	0.09~0.7	0.88~7.5	6.6~33	13~40	0~0.26	2.2~10	18~62	22~97
Lamas urbana	0.01~0.24	0.02~0.34	1.4~11	4.9~21	0.01~0.8	5.0~22	2.8~9.7	18~57
Resíduos orgânicos	0~0.25	0~0.01	0.1~0.48	0.04~0.61	-	0.17~3.2	0.02~1.6	0.13~2.1
Resíduos sólidos de processamento de metais	0.01~0.21	0~0.08	0.65~2.4	0.95~7.6	0~0.08	0.84~2.5	4.1~11	2.7~19
Cinza de carvão	6.7~37	1.5~13	149~446	93~335	0.37~4.8	56~279	45~242	112~484
Fertilizante	0~0.02	0.03~0.25	0.03~0.38	0.05~0.58	-	0.20~3.5	0.42~2.3	0.25~1.1
Marga	0.04~0.5	0~0.11	0.04~0.19	0.15~2.0	0~0.02	0.22~3.5	0.45~2.6	0.15~3.5
Impurezas de commodities	36~41	0.78~1.6	305~610	395~790	0.55~0.82	6.5~32	195~390	310~620
Deposição atmosférica	8.4~18	2.2~8.4	5.1~38	14~36	0.63~4.3	11~37	202~263	49~135
Total	52~112	5.6~38	484~1309	541~1367	1.6~15	105~544	479~1113	689~2054

Alguns resultados, como o de Holmes *et al.* (1974), tentam elucidar tais questões. No trabalho, os autores testam o tempo de residência para o Zn e o Cd em um ambiente aquoso e com sedimentos em suspensão. A conclusão à qual se chega é de que os elementos citados, em questão de apenas 1h, estariam totalmente

adsorvidos pelas partículas em suspensão. Kennet *et al.* (1971) e Frye e Shimp (1973) propõem que os metais se enriquecem também na matéria orgânica devido à troca de íons, complexação e quelação.

Conclui-se, então, que o estudo da especiação e do particionamento dos metais é de suma importância, uma vez que estas podem ser características decisivas para saber se o contaminante é biodisponível e/ou está sendo trocado com a água. Um estudo realizado por Angelidis e Grimanis (1989), na tentativa de encontrar os caminhos de mobilização destes elementos, demonstrou que os mesmos podem coprecipitar com óxidos, principalmente de Fe e Mn, serem adsorvidos nas faces cristalinas dos óxidos ou em argilominerais, ou complexarem com a matéria orgânica (Angelidis e Grimanis 1989).

4.3 Histórico de Candiota

Teixeira e Pestana (1997) apontam que os arroios Poacá e Carvoeira, associados à atividade mineira da região, têm valores de pH muito mais baixos do que o permitido pela legislação brasileira. Além de ser um problema para a biota do sistema e para o consumo humano, os baixos valores de pH ainda facilitariam a solubilização dos elementos contaminantes, possibilitando maior mobilidade e, por consequência, maior contaminação. Já no Arroio Candiota, associado à atividade da termelétrica e principal receptor dos seus efluentes, embora sejam observados valores de pH dentro da normalidade legal brasileira, foi constatada contaminação antropogênica por As e Hg. A região de Candiota já foi estudada por Fielder e Solari (1988); Morch (1991) e Hoffmann (2003). Segundo Hoffmann (2003), há contaminação de Cu, Zn e Fe nos arroios do entorno, porém a autora não pôde determinar se tais contaminações seriam antropogênicas ou não.

5 ÁREA DE ESTUDO

5.1 Caracterização da Área

O município de Candiota, de coordenadas 31° 33' 28' S e 53° 40' 22" O (Figura 4), localiza-se na região do pampa sul-rio-grandense, próximo à fronteira entre Brasil e Uruguai. Segundo IBGE (2008), a cidade está inserida na mesorregião sudeste Rio-grandense e na microrregião Serras de Sudeste. Sua área ocupa pouco mais de 930.000 quilômetros quadrados com uma população de 9.519 habitantes (IBGE, 2018). Segundo o mesmo autor, Candiota faz limite com os municípios de Aceguá, Hulha Negra, Bagé, Pinheiro Machado e Pedras Altas, distando aproximadamente 390 km da capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (DAER/RS *apud* SEBRAE, 2019). É composta por cinco distritos chamados Candiota, Baú, Jaguarão Grande, Passo Real de Candiota e Seival.

Segundo CPRM, 2018, a região de Candiota tem como principal fonte de renda e empregos as atividades relacionadas à mineração, tanto a de carvão mineral, como a de mármore. Recentemente, tem-se explorado a vitivinicultura com produção anual de vinho superando 500 mil litros e produção de azeite de oliva. Destaca-se também o cultivo de acácia e eucalipto para produção de MDF. Além destas atividades, há a criação de gado para corte, produção de leite e de lã. Historicamente a região apresenta assentamentos que hoje produzem sementes crioulas e cultivam árvores nativas. Recentemente o cultivo de pomares para produção alimentícia tem crescido, bem como o cultivo de soja, milho e tubérculos como cenoura e batata-inglesa.

5 – ÁREA DE ESTUDO

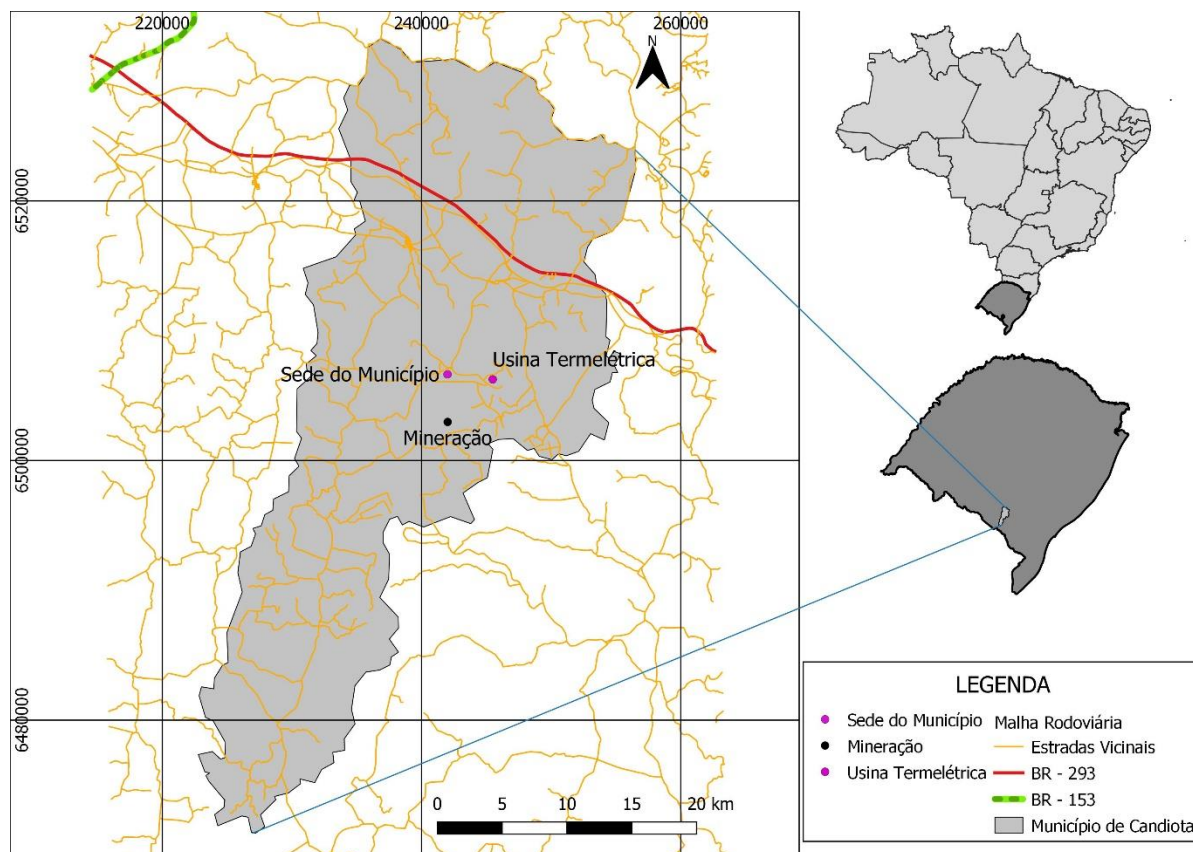


Figura 4: Mapa de localização do Município de Candiota e rede de estradas para acesso (dados disponibilizados por CPRM, 2015).

5.2 Aspectos da Fisiografia Local

5.2.1 Geologia

5.2.1.1 Geologia Regional

A geologia da região de Candiota é de alta complexidade (Figura 5). Um dos terrenos geologicamente mais diversos do Rio Grande do Sul apresenta desde rochas do paleoproterozoico até litologias mais recentes, datadas do Cenozoico. A maior parte da região é composta por litologias da Bacia do Paraná, onde se encontram as camadas de carvão exploradas.

5 – ÁREA DE ESTUDO

A litologia mais antiga da região, o Complexo Granulítico Santa Maria Chico, compõe a base do Bloco Taquarembó, um dos domínios tectônicos da geologia sul-rio-grandense (Oyhantçabal *et al.* 2018). Essa aparece na área norte da região de estudo. Segundo os autores, o complexo é composto por rochas de associações máficas-ultramáficas, paraderivadas, trondjhemitos, tonalitos e granodioritos (TTG's) com algumas ocorrências de *Banded Iron Formations* (BIFs).

Outro domínio tectônico na região é o Terreno Tijucas. O terreno apresenta alongamento na direção nordeste-sudoeste. Como *inliers* do terreno, aparecem os complexos Encantadas e Vigia, cujos ortognaisses estão tectonicamente interfoliados com rochas metavulcanosedimentares do Complexo Porongos (Oyhantçabal *et al.* 2018). Essas litologias são intrudidas pelo Metagranito Seival (Oyhantçabal *et al.* 2018). Segundo os autores, as litologias também apresentam relação de intrusão com o anfibolito Tupi Silveira, este intrusivo, que apresenta feições de metamorfismo regional no fácies anfibolito superior e está bandado.

O Cinturão Dom Feliciano é representado na região de estudo pelas rochas pertencentes ao Complexo Granítico-Gnáissico Pinheiro Machado, à Suíte Granítica Cordilheira e ao Complexo Granítico Dom Feliciano (Hoffmann, 2003). Todas formadas por granitoides em geral graníticos a monzograníticos. Também há ocorrências de rochas básicas associadas às intrusivas graníticas, como o Gabro Passo da Fabiana (Phillip e Machado, 2001 *apud* Fragoso Cesar *et al* 1991).

Na região há grande expressividade também de litologias formadoras da Bacia do Camaquã. A gênese da bacia não é totalmente entendida, portanto, não há um consenso (Borba 2006). São sugeridas diversas teorias de evolução tectônica para explicar a sua conformação. As rochas formadoras da bacia são provenientes de sedimentos de molassa, sedimentos marinhos, aluviais e até mesmo atividades vulcânicas. Acredita-se que a formação da bacia e a proveniência de seus sedimentos estejam intrinsecamente relacionadas à colisão continental que teria gerado o Cinturão Dom Feliciano. Na localidade do estudo estão presentes as formações iniciais da bacia, são elas a Formação Cerro Chato e Formação São Rafael, pertencentes ao Grupo Maricá. Na sequência da bacia e que também estão presentes na área de estudo estão as rochas da Formação Hilário com litologias vulcânicas (Grupo Bom Jardim), Formação Arroio dos Nobres com os membros Vargas e Mangueirão,

5 – ÁREA DE ESTUDO

Formação Acampamento Velho (vulcânica), Formação Rodeio Velho (vulcânica) e a Formação Pedra Pintada, representante de depósitos deltaicos do fim da Bacia do Camaquã.

A principal representante geológica na região, no entanto, é a Bacia do Paraná. Esta foi descrita intensivamente há mais de um século atrás pelo geólogo Charles White dando origem ao relatório que ficou conhecido como Relatório White (1908). Desde então muito se estudou e se descobriu na Bacia do Paraná. A interpretação de sua gênese é de que seria uma grande sinéclise paleozoica, construída sobre rochas continentais que passaram por subsidência cuja origem ainda é desconhecida, no entanto, acredita-se estarem relacionadas com a formação do Supercontinente Gondwana (Milani e Ramos 1998). É de grande importância científica, pois acumula o registro de aproximadamente 400 milhões de anos do eon Fanerozoico do supercontinente Gondwana (Milani e Ramos 1998). Na região de estudo, a Bacia do Paraná tem como representantes as formações Taciba, Rio Bonito, Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina, Rio do Rasto e ainda algumas intrusões básicas do Grupo Serra Geral. Destas, a litologia mais importante para o presente trabalho é a Formação Rio Bonito, pois nela estão localizadas as camadas de carvão exploradas em Candiota. Segundo CPRM (2007), a Formação Rio Bonito, é composta por arcóseos, siltitos, siltito carbonoso, quartzoarenito, folhelho carbonoso e carvão, *tonstein*, diamictito com matriz carbonosa e margas marcadores de um ambiente flúvio-deltaico, litorâneo e marinho plataformal. Como depósitos mais recentes, são reconhecidos a Formação Santa Tecla e Depósitos Aluvionares quaternários.

5 – ÁREA DE ESTUDO

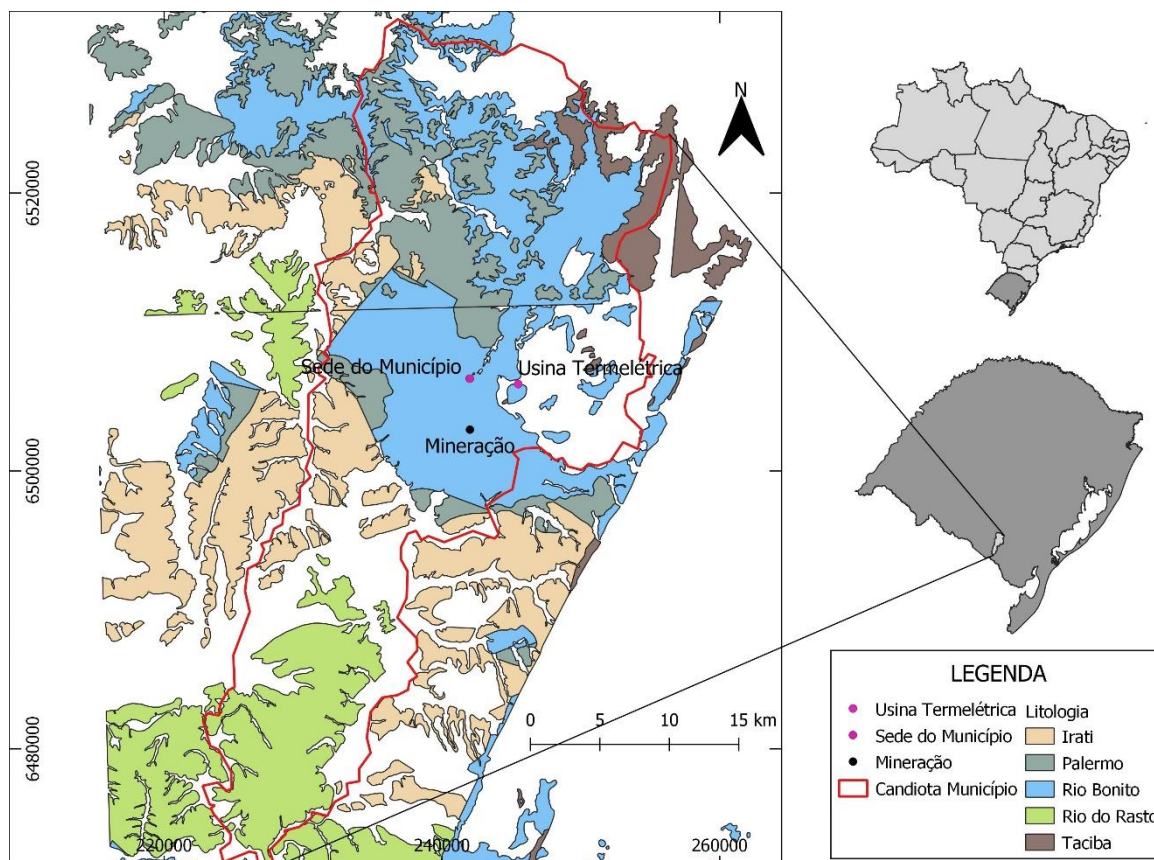


Figura 5: Mapa geológico simplificado da região de estudo. Confeccionado a partir de dados dos mapeamentos das folhas Hulha Negra (SH-22-Y-C-I) e Passo São Diogo (SH-22-Y-C-IV) realizado por CPRM na escala 1: 100.000. A linha preta representa o contorno do município de Candiota.

5.2.1.2 Geologia Local

Os principais depósitos de carvão no Brasil estão associados à Formação Rio Bonito do Grupo Guatá (De Matos *et al.* 2017), especialmente no centro e sul da Bacia do Paraná, localizados no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A Formação Rio Bonito tem como limite basal o Grupo Itararé, com o qual tem uma discordância marcada pela queda do nível do mar que deixou marcas de erosão nas camadas subjacentes (De Matos *et al.* 2017). O fim da deposição do Grupo Guatá é marcado pelo fim da deposição da Formação Piramboia e o fim do que é considerado como um mar epicontinental na Bacia do Paraná (De Matos *et al.* 2017). Segundo Della Fávera (1995), as camadas da Formação Rio Bonito são marcadas por diversos estágios estratigráficos, começando pelo trato de mar baixo, passando ao trato transgressivo, o qual pode-se dividir em três etapas, sendo a primeira uma camada de areia com

5 – ÁREA DE ESTUDO

feições de *onlap* nas camadas inferiores, marcando o primeiro momento da transgressão, a segunda é marcada por estágios de formação de sistemas de ilhas barreira-laguna, momento no qual os carvões teriam sido depositados, e a terceira marcada por uma camada de tempestitos (*apud* De Matos, 2017).

A estratigrafia local simplificada é composta por um banco inferior de carvão com aproximadamente 1 metro de espessura, seguida por uma camada de argilito intrabancos que marca um momento de inundação da laguna onde estariam sendo depositados os carvões. Após a camada de argilito intrabancos está o banco superior com aproximadamente 1 metro de carvão com algumas camadas pequenas de argilito intercalados (Figura 7). Acima disto, encontra-se a camada de argilito suprabancos, marcando nova inundação, seguida pelo chamado Banco Louco, uma camada de carvão inconstante, folhelhos carbonosos e arenitos (Figura 6 e Figura 7) (De Matos *et al.* 2017).

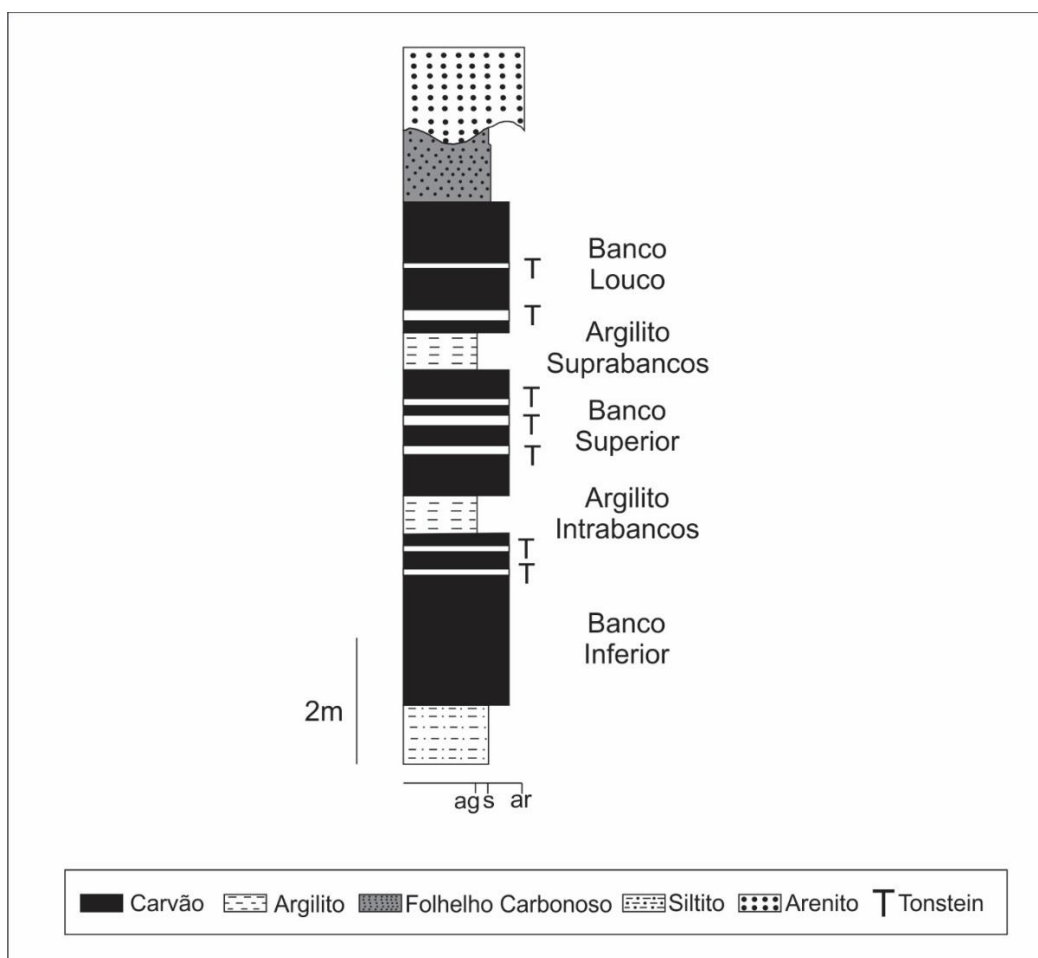


Figura 6: Coluna estratigráfica da região da Mina Candiota (modificado de De Matos *et al.* 2017).

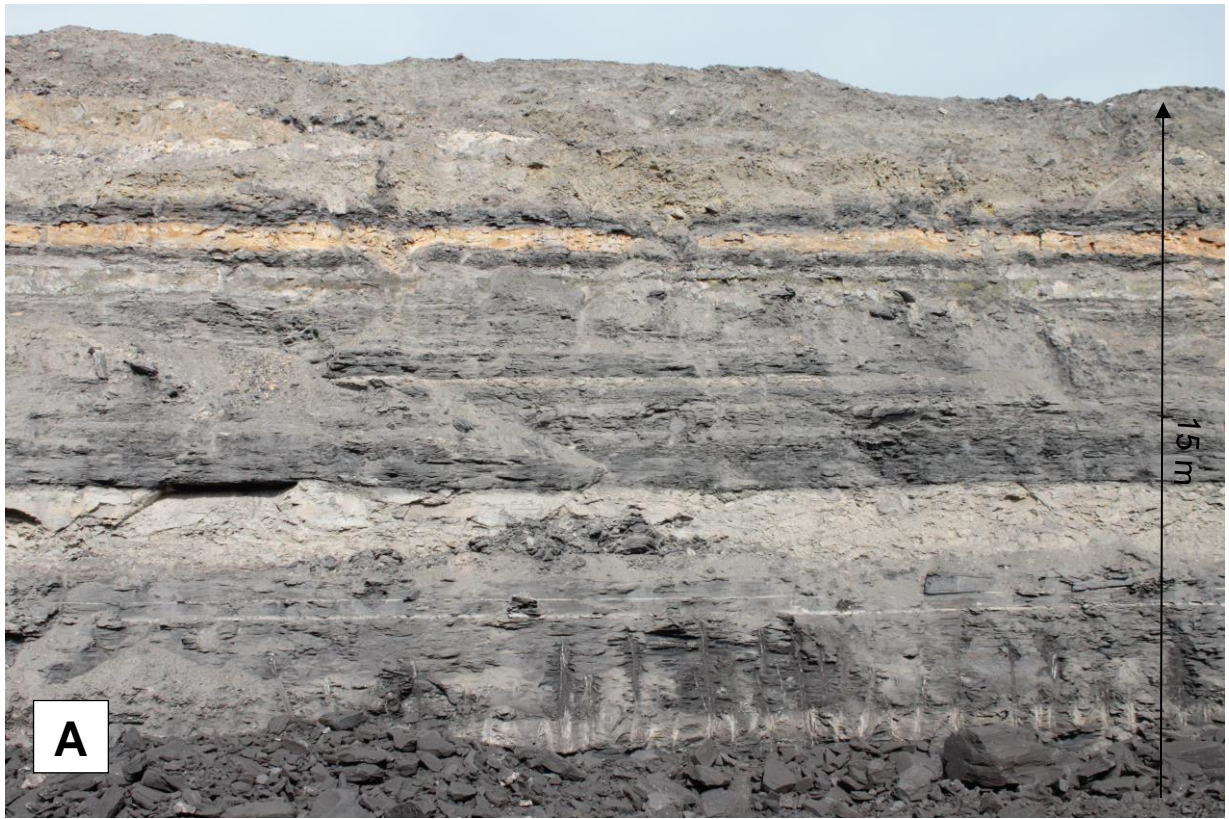


Figura 7: Em A, frente de lavra na Mina Candiota. Em B, testemunho de sondagem de Área da Mina Candiota, cedido pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM).

5.2.2 Geomorfologia

Segundo CPRM (2018), na região ocorrem amplamente dois tipos de domínios morfoestruturais. O primeiro deles é marcado pelo embasamento e é chamado embasamento em estilo complexo, já o segundo domínio é marcado pelas litologias remanescentes das rochas sedimentares da Bacia do Paraná. O limite entre os dois domínios é marcado pela Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu (ZCDC) que também gera feições geomorfológicas próprias (*apud* Franco, 1986 – Projeto Radam).

Ainda segundo CPRM (2018), o primeiro domínio pode ser dividido em dois. A primeira subdivisão, localizada na região sul de Candiota é denominada Planaltos Residuais Canguçu-Caçapava do Sul. A segunda subdivisão é reconhecida como Planalto Rebaixado Marginal e marca a ZCDC e, portanto, o contato com as coberturas sedimentares.

CPRM (2018), *apud* Franco (1986), classifica o segundo domínio, marcado pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná, como Depressão Ibicuí-Rio Negro. Já as áreas da Bacia do Arroio Candiota e a Bacia do Rio Jaguarão são compostas por relevo ondulado, conhecidos como coxilhas.

5.2.3 Hidrografia

A área do município de Candiota está inserida na bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, tendo sua porção mais meridional no contato com a bacia hidrográfica do Rio Camaquã (Figura 8). Estas são as duas maiores bacias hidrográficas da região, drenando grande parte das serras de sudeste para a Lagoa Mirim e para a Laguna dos Patos.

5 – ÁREA DE ESTUDO

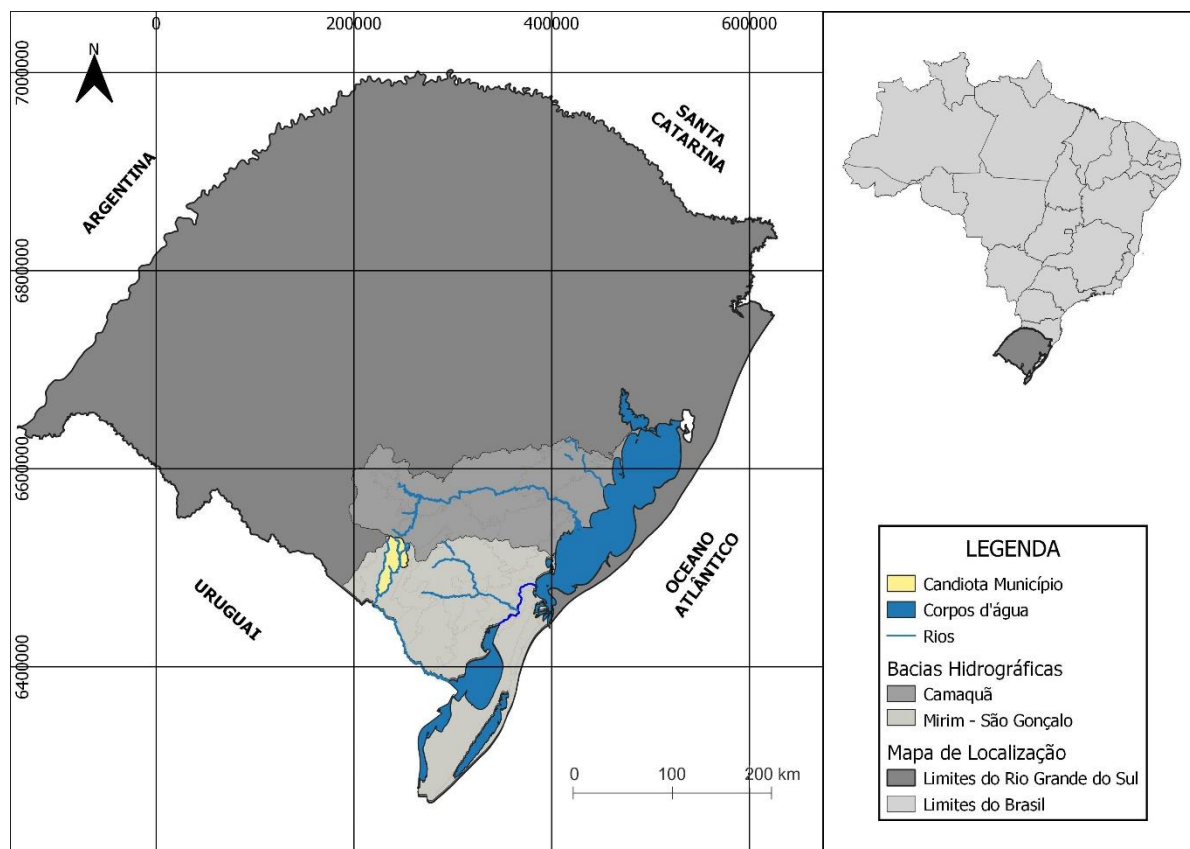


Figura 8: Mapa de localização das bacias hidrográficas e os principais rios que compõem a região (base de dados disponibilizada pelo Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO) do Centro de Ecologia da UFRGS).

O principal rio ao norte de Candiota é o Rio Camaquã, que recebe aporte hídrico e sedimentar dos arroios Torrinhãs e Velhaco, localizados na área ao norte dos empreendimentos e que podem ser influenciados pela atividade carvoeira. O Rio Camaquã deságua na Laguna dos Patos e é um dos maiores corpos d'água que influenciam a dinâmica hídrica e sedimentológica da laguna. Englobando Candiota está a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, drenada pelo Rio Jaguarão, que recebe aporte hídrico e sedimentar dos arroios Poacá e Candiota -diretamente afetados pela atividade carvoeira- e deságua na Lagoa Mirim, e pelo Rio Piratini, que recebe aporte hídrico e sedimentar do Arroio Basílio e deságua no Canal de São Gonçalo, uma estrutura hídrica que conecta a Laguna dos Patos, a norte, com a Lagoa Mirim, a sul.

5.2.4 Clima

O clima de Candiota, assim como a grande maioria das áreas no estado do Rio Grande do Sul, caracteriza-se por ser temperado, classificado, segundo IBGE (2002), como mesotérmico brando superúmido, ou seja, com média entre 10°C e 15°C sem nenhum mês com seca e com inverno ameno. Portanto, não há épocas sem pluviosidade, estando a chuva presente ao longo de todo o ano em concentrações variáveis (Figura 9).

Como é possível observar na Figura 9 e Tabela 2, Candiota está inserida num contexto climático com chuvas bem distribuídas totalizando anualmente cerca de 1.466 mm de precipitação. Sua temperatura média anual, segundo os dados a seguir, é de 17,88 °C tendo suas médias mínimas registradas nos meses de junho e julho (12,34 °C e 12,11 °C respectivamente) e suas médias máximas em janeiro e fevereiro (23,84 °C e 23,19 °C respectivamente).

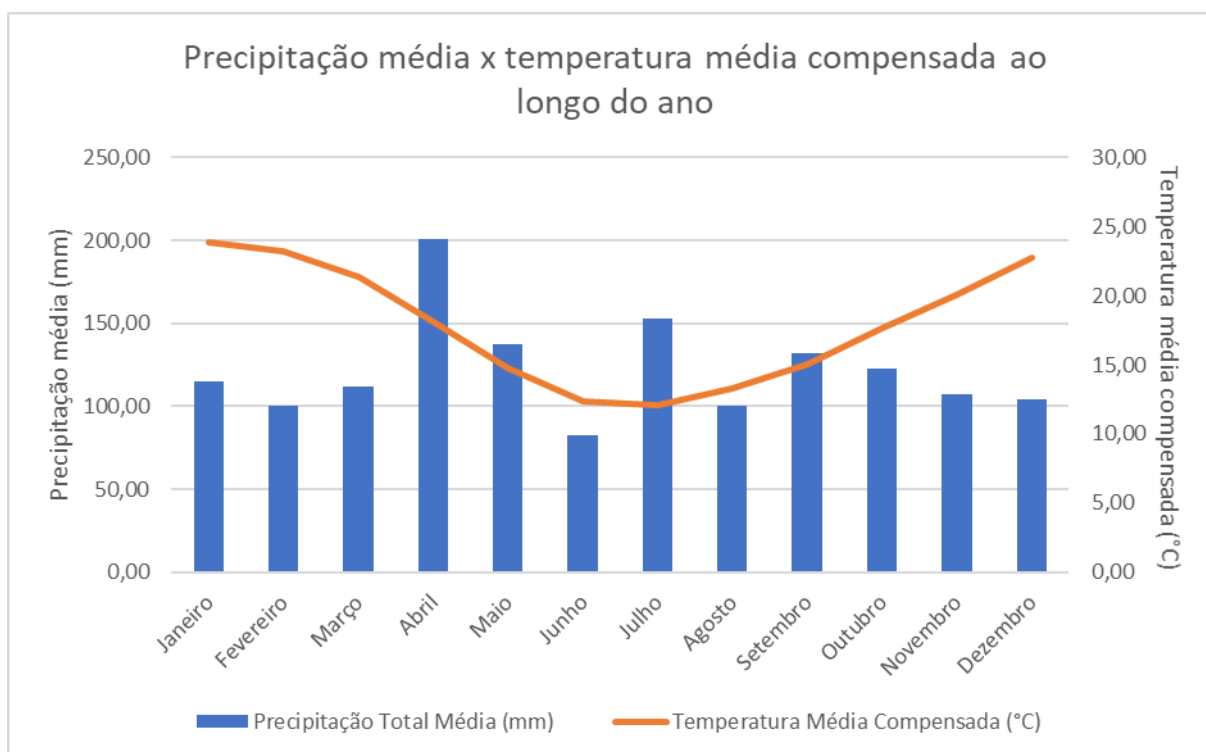


Figura 9: Gráfico confeccionado a partir de dados históricos da Estação Meteorológica de Bagé obtidos durante 58 anos e disponibilizados pela rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

5 – ÁREA DE ESTUDO

Tabela 2: Tabela de dados históricos das médias mensais das precipitações e temperatura ao longo de 58 anos. Utilizados para a confecção da Figura 9.

	Precipitação Total Média (mm)	Temperatura Média Compensada (°C)
Janeiro	114,60	23,84
Fevereiro	100,25	23,19
Março	111,75	21,39
Abril	200,75	18,08
Maio	137,33	14,81
Junho	82,57	12,34
Julho	152,60	12,11
Agosto	100,17	13,33
Setembro	131,63	15,06
Outubro	123,00	17,61
Novembro	107,50	20,10
Dezembro	104,43	22,73

6 METODOLOGIA

6.1 Pré-Campo

O pré-campo foi feito com o objetivo de direcionar os esforços e tornar o trabalho de campo bem-sucedido. Durante essa etapa, a área foi estudada com o auxílio de softwares, dados secundários e pesquisa bibliográfica, levando em conta as diversas variáveis que poderiam atuar no ambiente. Foram determinados previamente potenciais pontos de amostragem da rede de drenagem, baseando-se em especial em fatores como posicionamento em relação aos centros impactantes (atividade de mineração e termelétrica) e facilidade de acesso. Desta forma, buscou-se tornar consciente a amostragem, com a finalidade de fazer com que esta fosse a mais representativa possível da provável contaminação na região.

6.1.1 Análise Climática

A primeira etapa do pré-campo consistiu na análise de dados existentes da região. Dados climáticos adquiridos duas vezes por dia pelo INMET ao longo de cinquenta e oito (58) anos na Estação Meteorológica de Bagé e disponibilizados no *website* do mesmo foram tratados e interpretados de forma a levar em conta as direções do vento e dispersões das partículas em suspensão na atmosfera podendo assim estimar locais com provável contaminação e locais mais aptos a serem considerados pontos brancos, ou *background*. Esses dados foram tratados por meio do software Excel®. As informações sobre a direção dos ventos são disponibilizadas na forma de 37 códigos numéricos (Tabela 3), portanto é necessário fazer uma transcrição para direções reais.

6 – METODOLOGIA

Tabela 3: Exemplo do significado de alguns dos 37 códigos de vento disponibilizados pelo INMET.

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	DESC. SIMPLES
0	Calma	C
1	Norte - Nordeste	NNE
2	Norte - Nordeste	NNE
3	Norte - Nordeste	NNE
4	Norte - Nordeste	NNE
5	Nordeste	NE
6	Nordeste	NE
7	Este - Nordeste	ENE
8	Este - Nordeste	ENE
9	Leste	E
10	Leste	E

Foram coletados mais de cinquenta e quatro mil dados climáticos ao longo dos cinquenta e oito anos de medição solicitados. Para tratá-los foi utilizada uma combinação de fórmula condicional com fórmula de procurar valores, demonstrada a seguir.

Equação 1: Equação desenvolvida para a decodificação da informação climática cedida pelo INMET.

= SE(D54191
<>""; PROCV(D54191; CÓDIGOS!\$A\$2:\$C\$39; 3; FALSO); "Sem Informação")

A Equação 1 tem como objetivo procurar os valores de códigos fornecidos pela Estação Meteorológica de Bagé na tabela-mãe de códigos fornecida pelo INMET (Tabela 3). A primeira função da equação é uma função condicional “SE” utilizada para saber se há resultado de medições inseridas em determinada célula do Excel. Uma vez determinada a existência de resultado para a célula em questão, a próxima função é aplicada, caso não seja constatado resultado na célula, ela permanece sem resultado. A função chamada “PROCV”, ou procurar valor, tem por objetivo a busca do valor inserido na célula em questão na tabela-mãe na qual se encontram os códigos com suas respectivas direções reais de vento. Uma vez encontrado o valor da célula na tabela-mãe, a equação retorna o valor de direção dos ventos para o código em questão (Tabela 4).

6 – METODOLOGIA

Tabela 4: Tabela elaborada com os dados brutos (colunas A, B, C, D e E) e dados tratados (coluna F).

A	B	C	D	E	F
Estacao	Data	Hora	DirecaoVento	VelocidadeVento	DirecaoRealVento
83980	01/01/1961	1200	32		1 NW
83980	01/01/1961	1800	14		1 SE
83980	02/01/1961	0	0		0 C
83980	02/01/1961	1200	36		3 N
83980	02/01/1961	1800	18		3 S
83980	03/01/1961	0	9		1 E
83980	03/01/1961	1200	9		3 E
83980	03/01/1961	1800	14		5 SE
83980	04/01/1961	0	14		1 SE
83980	04/01/1961	1200	9		1 E
83980	04/01/1961	1800	18		2 S
83980	05/01/1961	0	0		0 C
83980	05/01/1961	1200	5		7 NE
83980	05/01/1961	1800	9		3 E
83980	06/01/1961	0	9		1 E

A	B	C	D	E	F
83980	26/12/2018	0	5		5 NE
83980	26/12/2018	1200	5		3 NE
83980	26/12/2018	1800	5		3 NE
83980	27/12/2018	0	5		5 NE
83980	27/12/2018	1200	5		1 NE
83980	27/12/2018	1800	5		1 NE
83980	28/12/2018	0	36		1 N
83980	28/12/2018	1200	36		1 N
83980	28/12/2018	1800	23		1 SW
83980	29/12/2018	0	5		5 NE
83980	29/12/2018	1200	5		3 NE
83980	29/12/2018	1800	5		1 NE
83980	30/12/2018	0	5		1 NE
83980	30/12/2018	1200	36		1 N
83980	30/12/2018	1800	5		3 NE
83980	31/12/2018	0	18		3 S
83980	31/12/2018	1200	14		3 SE
83980	31/12/2018	1800	9		3 E
83980	01/01/2019	0	9		3 E
83980	01/01/2019	1200	5		5 NE
83980	01/01/2019	1800	5		1 NE

Depois de tratados os dados e obtidos os resultados de direção real dos ventos para cada uma das medições realizadas na Estação Meteorológica de Bagé e disponibilizadas pelo INMET, foi feita a contagem total de medições e então separadas em classes de acordo com a sua orientação (Tabela 5).

6 – METODOLOGIA

Tabela 5: Frequência de ocorrência dos ventos e porcentagem.

Direção do Vento	Quantidade de Medições	Porcentagem
N	4243	7,83%
NE	12497	23,05%
E	5634	10,39%
SE	8585	15,84%
S	3671	6,77%
SW	5609	10,35%
W	2031	3,75%
NW	4963	9,16%
C	6968	12,85%
Sem Informação	2	0,00%
Total	54203	99,99%

O gráfico abaixo (Figura 10) permite que os dados de vento sejam interpretados e considerações sejam feitas acerca da dispersão de fumaça, poeira e cinzas. Essa informação é essencial na hora da escolha de locais de estudo de maneira a entender como este pode estar sendo afetado por empreendimentos vizinhos. Neste sentido, tomando como centro a chaminé principal da termelétrica, pode-se determinar quadrantes onde se espera que haja maior e menor contaminação. Assim, foi elaborado um mapa com o intuito de auxiliar no processo de escolha de um *background* e de locais de amostragem que condigam com possíveis contaminações provenientes de poeiras e cinzas (Figura 11).

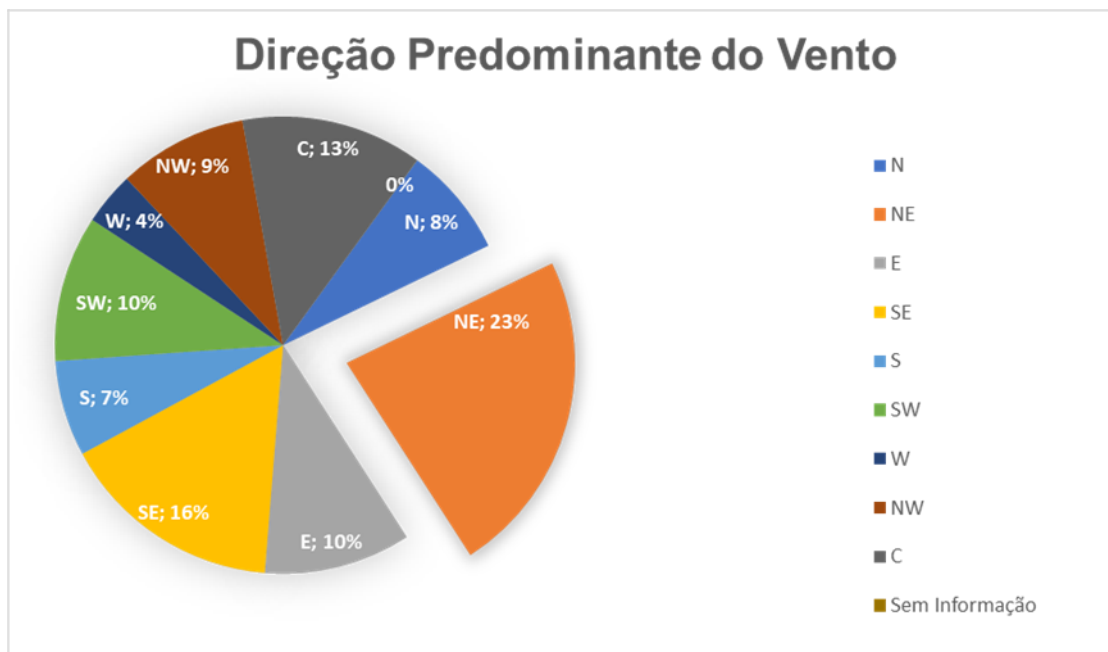


Figura 10: Gráfico em pizza das porcentagens das direções preferenciais dos ventos. O resultado de 0% representa a classe “Sem Informação”, enquanto a classe C é a considerada de calmaria de ventos.

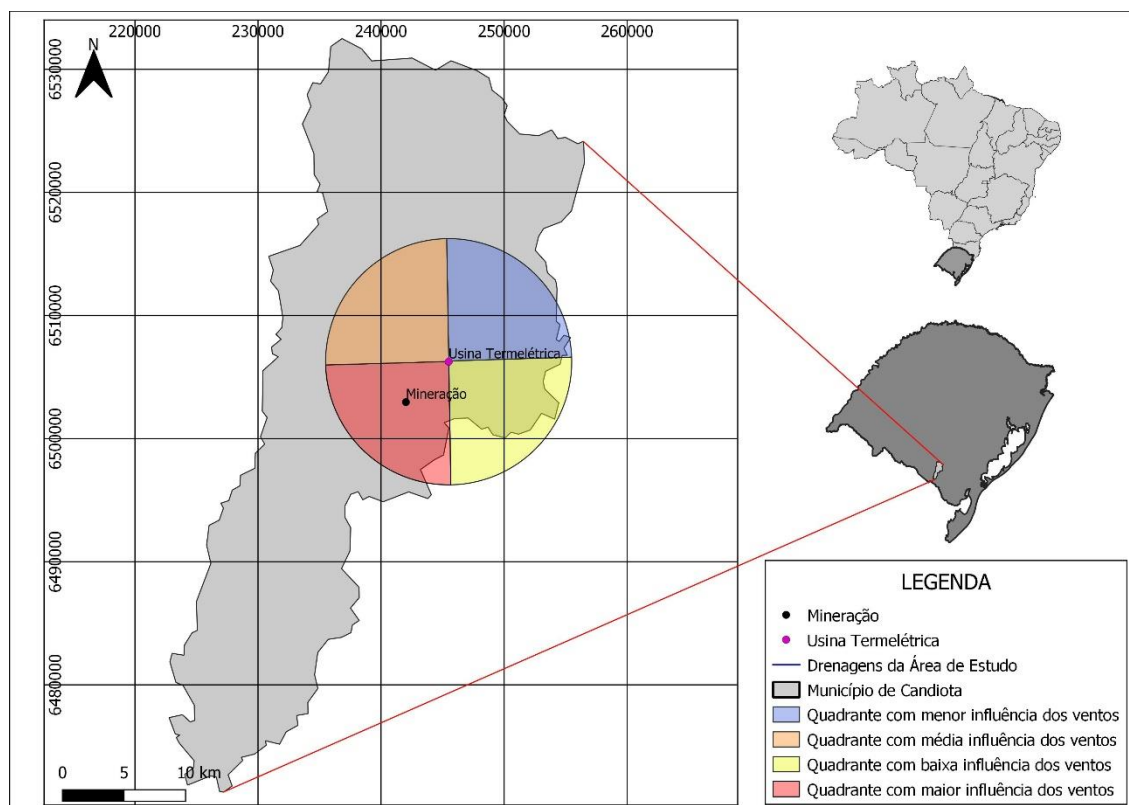


Figura 11: Mapa de influência dos ventos confeccionado com base cartográfica disponibilizada por CPRM (2015) e com dados climáticos tratados a partir de dados brutos disponibilizados pelo INMET.

É possível notar que mesmo que o vento nordeste seja o preferencial, tendo sido o mais medido durante o período analisado, os ventos tendem a se concentrar em duas direções principais. A mais proeminente é a direção NE-SW, seguida da direção NW-SE.

6.1.2 Análise de Terreno

A metodologia de pré-campo contou também com uma análise das condições do terreno. Foram estudadas as drenagens, suas formas e bacias hidrográficas, com o auxílio do software livre de geoprocessamento, QGIS. Além disso, levou-se em conta a geologia da região para a escolha dos pontos a serem amostrados bem como para o *background*. Para a amostragem foram escolhidos dois arroios cujas drenagens estivessem cortando áreas que fossem representadas geologicamente pela Formação Rio Bonito e que drenassem os centros de impactos monitorados (mineração e termelétrica). Os pontos de amostragem foram dispostos ao longo destes dois arroios de forma a representar áreas localizadas nas cabeceiras, no meio e a jusante.

As camadas de rede de drenagens (Figura 12) e litologia (Figura 13) foram obtidas no *website* do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) como produtos vetoriais das cartas geológicas Passo São Diogo e Hulha Negra. Ambas as cartas foram mapeadas na escala 1:100.000.

6 – METODOLOGIA

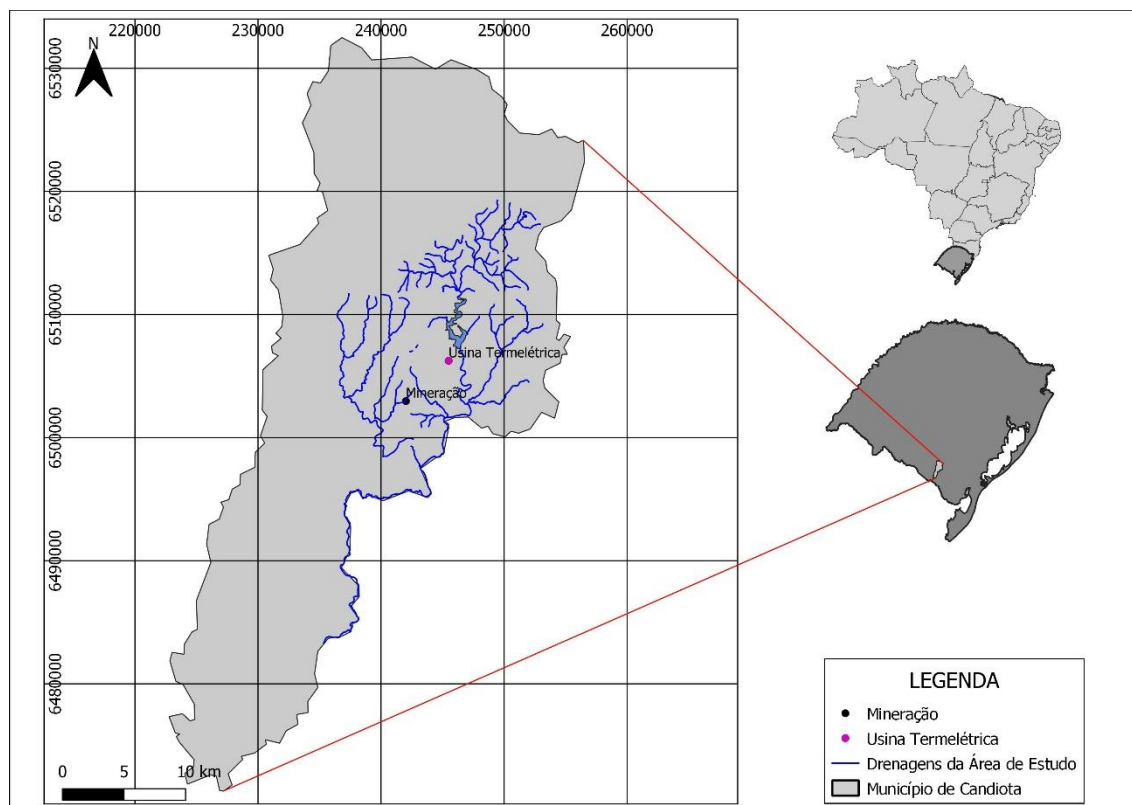


Figura 12: Mapa da rede de drenagens da região do estudo confeccionado a partir de base cartográfica e hidrográfica disponibilizada por CPRM na escala 1:100.000 (2015).

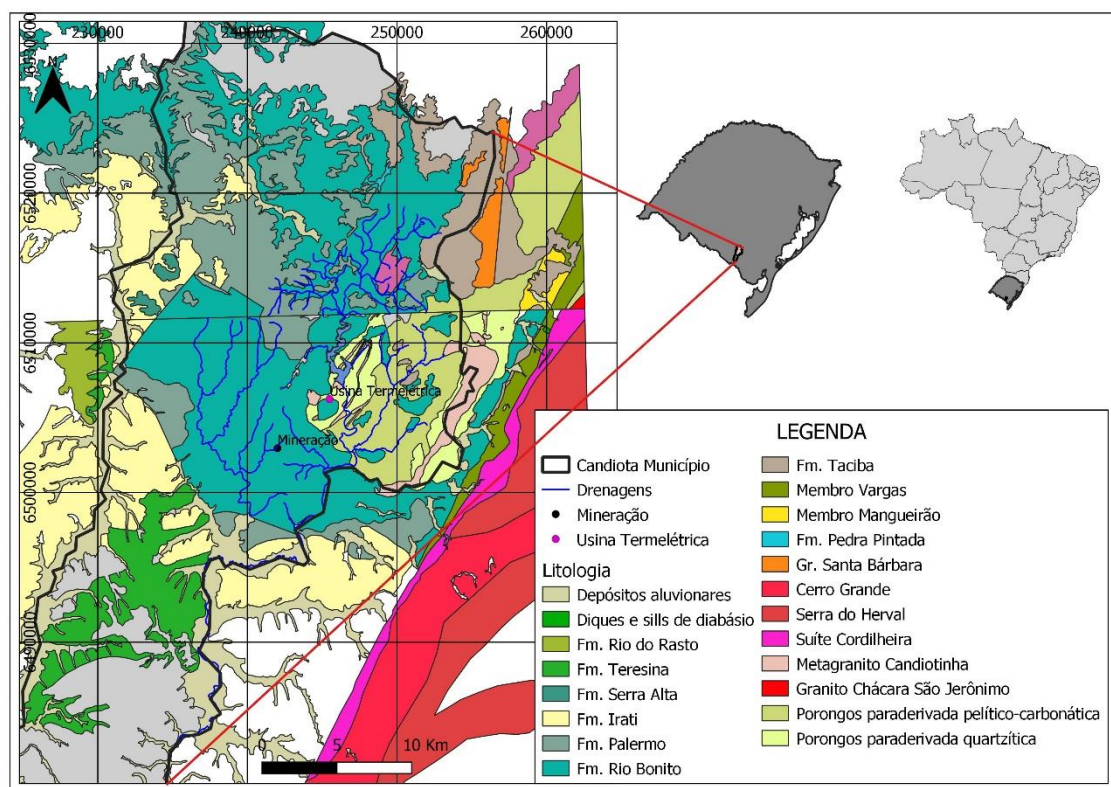


Figura 13: Litologias e drenagens da região. Mapa confeccionado a partir de base cartográfica e dados geológicos disponibilizados por CPRM (2013 e 2015). A rede de drenagem apresentada é uma simplificação da realidade.

6.1.3 Análise do Uso do Terreno

Após terem sido estudadas as condições naturais da área, o foco tornou-se o uso e ocupação do solo da região. Candiota é intensamente ocupada e explorada para diversas finalidades. Além da mineração de carvão e da usina termelétrica, históricas na região, há o plantio de uvas para vinicultura e o plantio de olivas para produção de azeite. A pecuária tem grande participação na ocupação do solo, com grande produção de carne bovina. Na região também há assentamentos do Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST) onde é praticada a agricultura de subsistência, a criação de diversas mudas nativas e o comércio de sementes crioulas. Em antigas cavas da Mina Candiota, operada pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM), há um grande aterro sanitário que recebe resíduos domésticos de toda a metade sul do estado. Conhecido como Metade Sul, o aterro está localizado ao lado da mineração de carvão e às margens do Arroio Carvoeira que recebe os efluentes de ambas as indústrias (Figura 14).

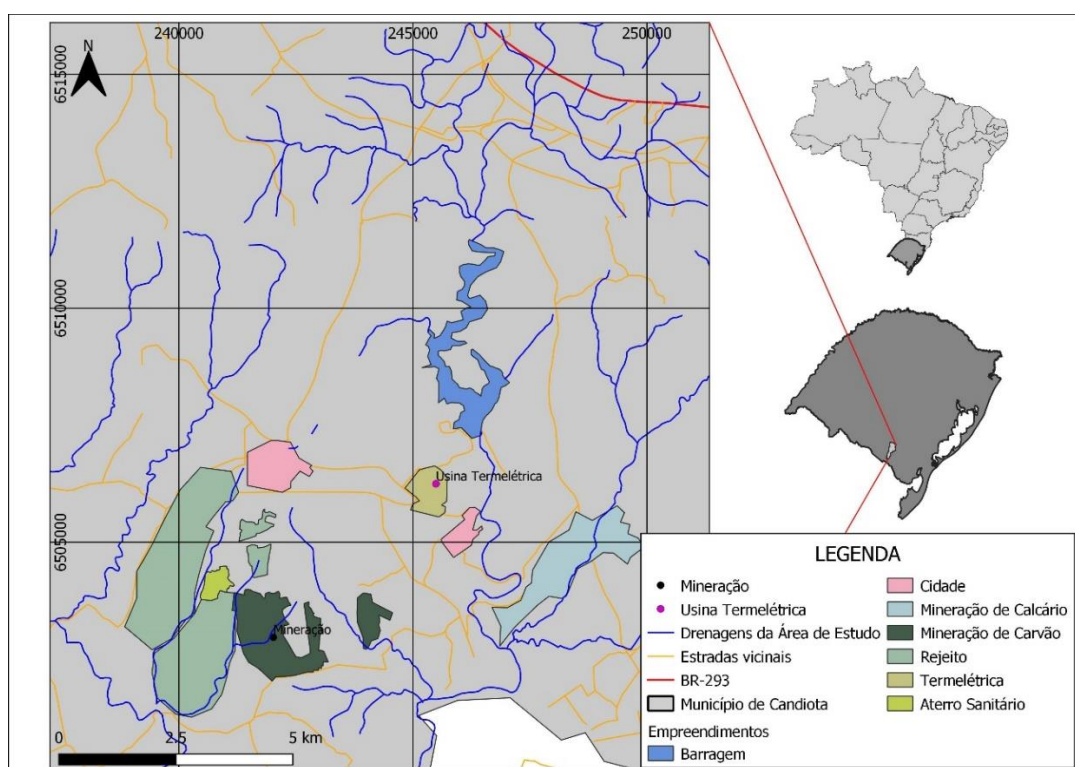


Figura 14: Mapa de uso do solo voltado para a mineração, termelétrica, aterro sanitário e principais áreas urbanizadas. Mapa confeccionado a partir de base cartográfica disponibilizada por CPRM (2015) e imagens de satélite disponibilizadas pela Google Satellite.

6.1.4 Análise de Acessibilidade

Outro importante fator que foi considerado na hora de escolher os pontos para amostragem foi a acessibilidade dos locais. Sendo assim, utilizou-se o QGIS para adicionar uma camada de rodovias e estradas vicinais às camadas que já estavam sendo analisadas (Figura 14). Desta forma, foi possível integrar as demais informações com a rede de drenagens e com a disponibilidade de estradas e, assim, definir os pontos para amostragem.

6.1.5 Escolha dos Pontos de Amostragem e *Background*

Passado todo o processo de análise prévia do local, como visto nos capítulos anteriores, foram decididos os pontos a serem amostrados. O *background*, ou ponto branco, precisa ser um lugar que reflita a composição mais natural de sedimentos possível. Portanto, buscou-se um local cuja litologia drenada pelos arroios fosse a Formação Rio Bonito, onde se encontra o carvão, mas que também atendesse aspectos importantes como estar no quadrante de menor influência dos ventos e que não houvesse um grande empreendimento perto que pudesse estar contaminando. O ponto foi locado em uma drenagem no Arroio Sanga Funda que desemboca no Arroio Candiota a nordeste dos empreendimentos (Figura 15).

6 – METODOLOGIA

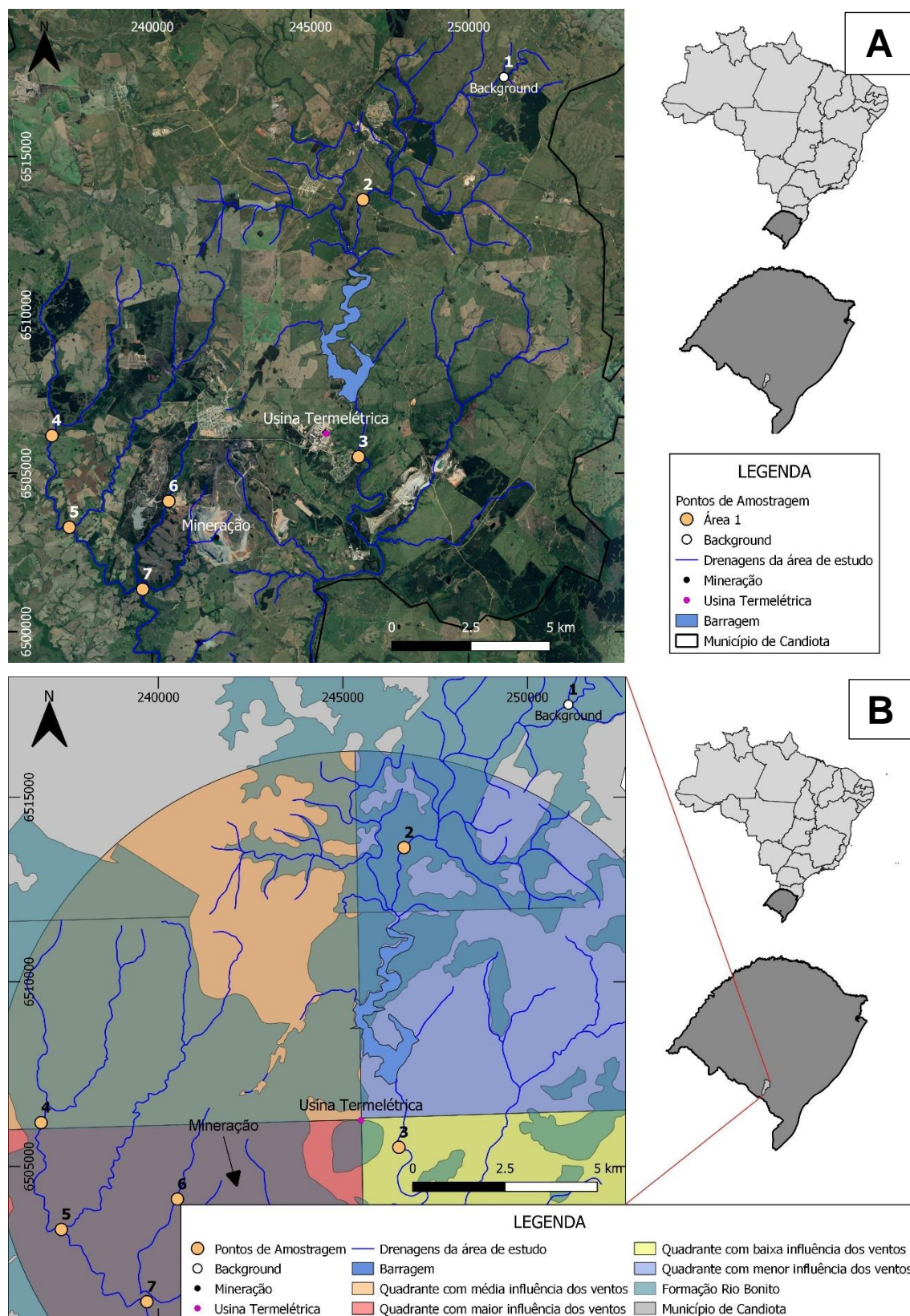


Figura 15: Em A, mapa de localização geral dos pontos de amostragem. Em B, mapa de localização dos pontos de amostragem e do background comparados à localização da Formação Rio Bonito e aos quadrantes de influência do vento.

6 – METODOLOGIA

Tendo sido escolhido o ponto branco, foram pensados os pontos de amostragem. Da mesma forma que foi feito para o *background*, os pontos de amostragem precisariam estar em locais que drenassem a Formação Rio Bonito e que, dessa vez, fossem influenciados pelos ventos e/ou diretamente pelos empreendimentos. Finalmente, foram selecionados dois arroios para estudo. O primeiro, o Arroio Candiota, que é influenciado principalmente pelos efluentes da usina termelétrica e o segundo, o Arroio Poacá e seus afluentes, influenciados direta e intensamente pela mineração de carvão (Figura 16).

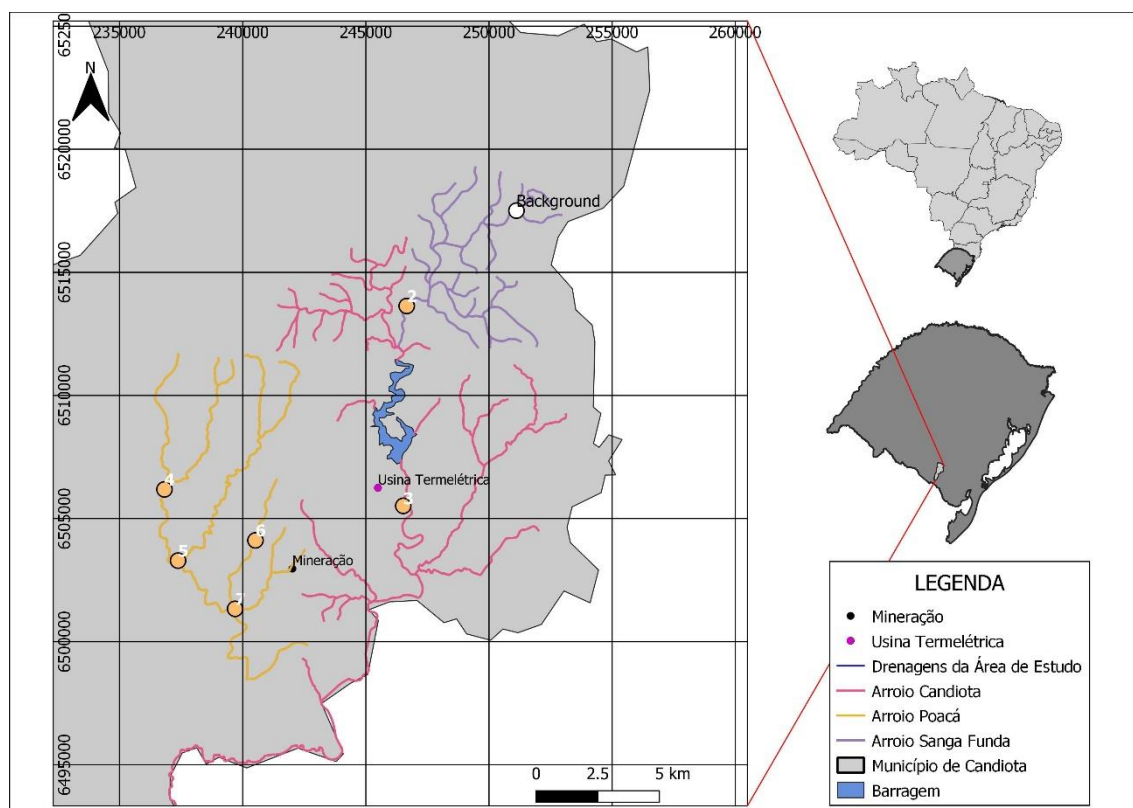


Figura 16: Mapa de localização dos arroios escolhidos para o estudo. Confeccionado a partir de base cartográfica e hidrográfica disponibilizada por CPRM (2015).

6.1.6 Preparação do Material para o Trabalho de Campo

Todo o material utilizado para a coleta dos sedimentos de fundo passou por lavagem especial explicitado segundo ANA e CETESB (2011). Os potes de polipropileno passaram por banho de ácido nítrico 10% durante 48h.

6.2 Trabalho de Campo

O trabalho de campo foi realizado em abril de 2019 e teve duração de seis dias. O primeiro dia foi crucial para o reconhecimento da região em termos de acessibilidade e também contato com as pessoas responsáveis pelos empreendimentos. Foram visitadas as sedes da CRM e da Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - Eletrobras (CGTEE) onde se explicou o escopo do projeto e conversou-se sobre as perspectivas de amostragem e acesso aos pontos. Os dias seguintes foram dedicados à coleta e preparação das amostras.

6.2.1 Coleta de Amostras

A coleta realizada para a presente pesquisa teve como objetivo dois tipos de material, abaixo explicitados.

6.2.1.1 *Sedimentos de Fundo*

Os sedimentos de fundo foram coletados separadamente para dois tipos de análises. Primeiramente foram coletados em sacos plásticos para análises granulométricas. Após, foram coletados em potes de polipropileno para análises químicas. A coleta foi feita de duas formas, quando possível utilizando uma pá de jardinagem e quando necessário usando uma Draga Van Veen (Figura 17). As amostras foram acondicionadas e devidamente identificadas de acordo com os pontos

6 – METODOLOGIA

de coleta. No momento da coleta, foram utilizadas luvas plásticas para proteção individual e após álcool para esterilização das mãos.



Figura 17: Em A, coleta de amostra no ponto branco utilizando pá. Em B, coleta de amostra utilizando Draga Van Veen. Em C, coleta de amostra utilizando macacão impermeável para entrar no arroio. Em D, coleta de amostra utilizando pá.

No ponto branco, na barra de acreção lateral do rio, foram observados diferentes tipos de rochas compondo sedimentos de tamanho cascalho, inclusive fragmentos de carvão (Figura 18). Encontrar carvão onde foi decidido amostrar o *ponto branco* é positivo, pois assim o *background* tem representatividade da geoquímica da região, imposta pela camada composta pela Formação Rio Bonito.



Figura 18: Peça de carvão identificado na barra de acreção lateral do rio correspondente ao ponto branco.

6.2.1.2 Sedimento em Suspensão

Os sedimentos em suspensão foram coletados através da filtração da água dos arroios. Nos pontos foram coletados galões de água que foram armazenados até a volta para a pousada onde havia a infraestrutura necessária para o procedimento de filtração. Uma vez na pousada, as amostras de água passaram por filtração utilizando um *holder* com filtros de celulose de 62 μm e bomba a vácuo (Figura 19). Durante o procedimento de filtração das amostras, o material foi limpo com água bideionizada evitando assim a contaminação cruzada.

6 – METODOLOGIA



Figura 19: Procedimento de coleta de sedimento em suspensão e filtragem.

6.2.2 Pontos de Amostragem

Foram escolhidos sete pontos para amostragem.

6.2.2.1 Ponto 1 ou Background

O ponto 1, o ponto branco, foi escolhido tomando como base diversos fatores explicitados no capítulo 6.1.5. O arroio escolhido para o ponto foi o Arroio Sanga Funda, afluente do Arroio Candiota (Figura 20). O arroio no ponto escolhido corta afloramentos da Formação Rio Bonito. A principal atividade observada no entorno é a pecuária.



Figura 20: Arroio Sanga Funda no Ponto 1 (considerado background).

6.2.2.2 Ponto 2

O ponto 2 é localizado no Arroio Candiota (Figura 21) a montante da barragem da usina termelétrica, portanto, a montante do emissário de efluentes do

empreendimento. De mesma forma, o ponto não recebe influência direta da Mina Candiota, estando localizado a nordeste da mesma.



Figura 21: Coleta de amostra de sedimento de fundo no Ponto 2.

6.2.2.3 Ponto 3

O ponto 3 está localizado no Arroio Candiota imediatamente a jusante da represa da termelétrica e do emissário de efluentes líquidos (Figura 22). O ponto não recebe influência direta da mineração e está localizado a leste da mesma.



Figura 22: Coleta de amostra de sedimento de fundo para análise granulométrica no Ponto 2.

6.2.2.4 Ponto 4

O ponto 4 é localizado no Arroio Poacá (Figura 23). Esta parte do arroio apresenta água com coloração alaranjada, o que pode indicar interferência na qualidade do arroio devido ao fato de estar muito próximo da Mina Candiota.



Figura 23: Coleta de amostras no ponto 4.

6.2.2.5 Ponto 5

O ponto 5 é localizado no Arroio Poacá (Figura 24). A água apresenta coloração azul esverdeada com sedimento alaranjado podendo estar altamente alterada devido à proximidade com a Mina Candiota.



Figura 24: Drenagem no Arroio Poacá, ponto 5.

6.2.2.6 Ponto 6

O ponto 6 está localizado em uma drenagem no Arroio Carvoeira que deságua no Arroio Poacá (Figura 25). A drenagem corta diretamente os rejeitos da mineração de carvão e corre ao lado de um aterro sanitário. Suas condições indicam alta contaminação, apresentando sedimentos e água alaranjados e odor forte.



Figura 25: Coleta de amostra de sedimento em suspensão no Arroio Carvoeira, afluente do Arroio Poacá.

6.2.2.7 Ponto 7

O ponto 7 está localizado no encontro das águas do Arroio Poacá com o Arroio Candiota (Figura 26). Sua aparência demonstra que está bastante impactado pela atividade mineira. Possui água e sedimentos alaranjados.



Figura 26: Ponto 7 no Arroio Poacá, a jusante da mineração de carvão da Mina Candiota.

6.3 Preparação das Amostras

A Figura 27, a seguir, representa um fluxograma do processo de amostragem e quais metodologias foram empregadas na análise de cada parte do material coletado, bem como quais tipos de material foram alvos.

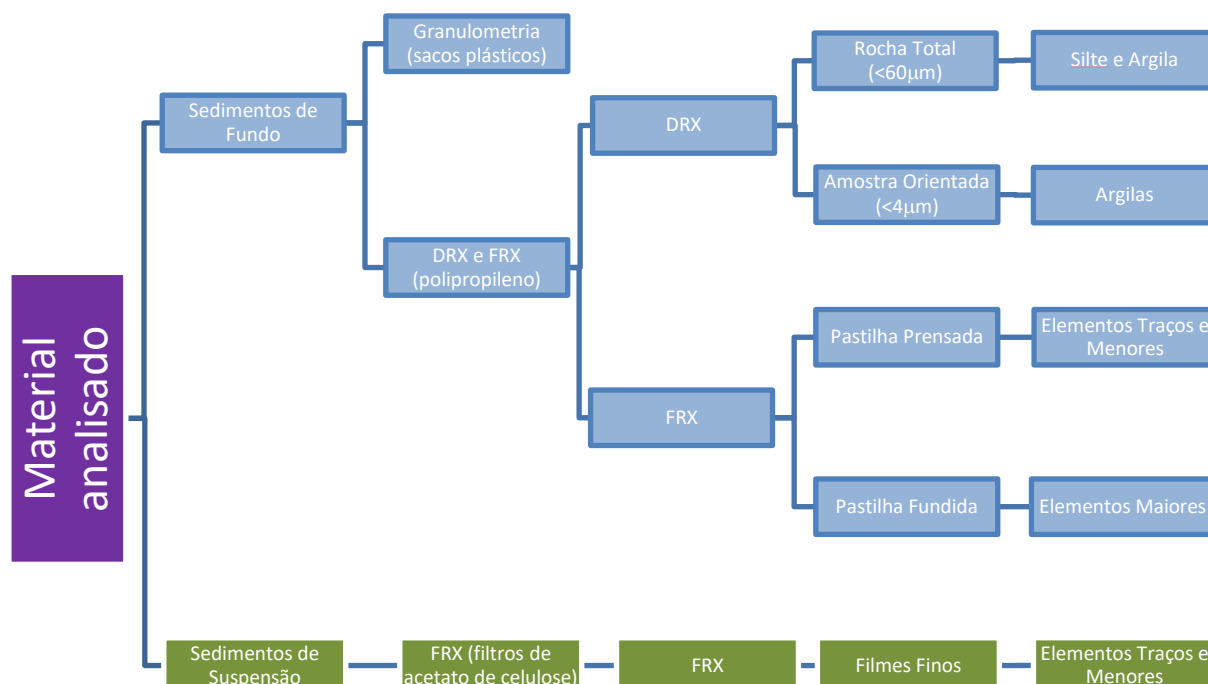


Figura 27: Fluxograma do processo de análise dos materiais.

6.3.1 Granulometria

Foram coletadas sete amostras para granulometria, sendo uma por ponto de amostragem. No laboratório, as amostras para granulometria começaram a ser preparadas. A primeira etapa consistiu em secar as amostras em estufas variando de 55°C a 57°C. O processo de secagem durou por volta de 48 horas e, logo após concluído, as amostras passaram por quarteamento e posterior pesagem. Após o quarteamento e a pesagem, foram selecionadas as amostras que visivelmente tinham conteúdo de sedimentos finos (argila e silte) em quantidades consideráveis (amostras

6 – METODOLOGIA

PT-02, PT-03, PT-05 e PT-07). As amostras selecionadas foram peneiradas usando peneiras entre 16 mm e 0,062 mm.

O conteúdo de finos foi quantificado utilizando métodos de decantação em tubos de vidro (Figura 28 e Figura 29). Foi adicionado defloculante na medida de 0,0087 grama para evitar que os grãos finos formassem agregados. Após duas horas de decantação, parte do líquido sobrenadante foi pipetado em uma placa de petri para secagem. Assim obteve-se o conteúdo de argila. Todo conteúdo de cada uma das classes de tamanhos de grãos foi quantificado, à exceção do silte, que decantou no processo de obtenção da quantidade de argila. Para quantificar o silte, calculou-se a partir do peso inicial da amostra, o quanto foi perdido em relação à soma do peso obtido para cada classe granulométrica, sendo assim, o valor para o conteúdo de silte.

Para as amostras que não foram selecionadas por não conterem conteúdo de finos em quantidade considerável, foi realizada a análise granulométrica utilizando as mesmas peneiras de 16mm a 0,062mm, porém o material que passou na última peneira (0,062mm), ou seja, argila e silte, não foi discriminado. Portanto, para os pontos PT-01, PT-04 e PT-06 não houve diferenciação entre o que é argila e o que é silte. As tabelas de cálculo de granulometria estão inseridas no Anexo I: Tabelas de granulometria.



Figura 28: Processo pós pesagem das amostras e suas respectivas fichas laboratoriais.



Figura 29: Preparação das amostras para análise granulométrica. Processo de decantação do silte e pipetagem da argila.

6.3.2 Análise Mineralógica e Química

As análises químicas com o objetivo de constatar se há contaminação ambiental e possível liberação de elementos tóxicos do meio físico (água, sedimentos e rochas) para o meio biótico têm como foco os argilominerais. Segundo Klein e Dutrow (2009), os argilominerais são compostos por folhas tetraédricas e octaédricas intercaladas compostas fundamentalmente por silício, oxigênio e o grupo hidroxila. Nas suas estruturas também estão comumente presentes o alumínio e elementos dos grupos dos metais alcalinos e metais alcalinos-terrosos. Muitas vezes, o silício constituinte do tetraedro é substituído pelo alumínio. Esta substituição, denominada substituição polimórfica, acarreta polarização da superfície da molécula, uma vez que o silício é tetravalente e o alumínio é trivalente. Por causa de suas superfícies polares, os argilominerais são carreadores de diversos tipos de elementos, muitos deles nocivos, como metais pesados, alvos do presente estudo.

Sendo assim, a partir do material coletado nos arroios, fez-se a separação da parte fina ($< 60 \mu\text{m}$), fração na qual estão inseridos os argilominerais e a fração silte. Durante o processo de preparação das amostras, todos os utensílios laboratoriais foram cuidadosamente lavados com água corrente, posteriormente com água bideionizada e então imersos em ácido nítrico (NO_3) por 12h para depois serem novamente lavados com água bideionizada. Entre cada preparação de cada amostra, todo o procedimento foi refeito.

A separação da fração menor que $60 \mu\text{m}$ foi feita da seguinte forma. Aos sedimentos, foram adicionados aproximadamente dois litros de água bideionizada, e, após, o material foi mexido para que os sedimentos finos entrassem em suspensão. A água na qual os sedimentos finos ficaram em suspensão foi transferida para outro pote passando por uma peneira de plástico com tamanho entre $50 \mu\text{m}$ e $60 \mu\text{m}$ (250 mesh). Portanto, todo o material que passou pela peneira está entre a fração silte e argila e em suspensão na coluna d'água. Parte desta solução de água bideionizada com sedimento foi reservada para processos de preparação de pipetagem em lâminas para análises por Difractometria de Raios X. O restante do material passou por processo de decantação, adicionando-se $0,2 \text{ mg}$ de cloreto de cálcio para acelerar o processo. Após algumas horas de estagnação da coluna d'água, tendo sido todo sedimento decantado, o líquido sobrenadante foi retirado com o auxílio de pipetas. O material decantado foi para a estufa a 40°C até que secasse por completo. Após estarem totalmente secos, os sedimentos foram desagregados com gral e pistilo de ágata (Figura 30). Dois gramas desse material foram analisados por Difractometria de Raios-X (DRX) pelo método de Rocha Total, enquanto dez gramas foram analisados por Fluorescência de Raios-X (FRX).

6 – METODOLOGIA



Figura 30: Amostra peneirada sendo desagregada utilizando gral e pistilo de ágata.

6.3.2.1 Difractometria de Raios-X (DRX)

Os equipamentos utilizados são os dois difratômetros disponíveis no laboratório de DRX do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq): Siemens (Bruker) D-5000 (theta/theta) e (theta/2theta) com tubos de raios X de Cu K α (Figura 31D). A técnica consiste em irradiar raios X em lâminas finas das amostras sob diferentes ângulos. Esse feixe, gerado a partir de um tubo de cobre sob condições energéticas de 40kV e 25 mA, atinge as partículas e é então difratado. Cada partícula difratará esse feixe de maneira específica, de acordo com a sua ordenação atômica nos sítios cristalográficos e seguindo a Lei de Bragg (Formoso, 1984). O resultado é um difratograma que consiste em curvas e picos indicando as distâncias interatômicas detectadas em angstroms (Å) em função do ângulo (2θ), medido por um goniômetro, e o número de contagens (*counts*) (Figura 31E). A partir deste resultado, é possível fazer uma análise qualitativa do tipo de mineral detectado usando bancos de dados e bibliografia adequada. A precisão da técnica depende de dois fatores, sendo o primeiro a medição das distâncias interatômicas que são da ordem de 10^{-14} metros (0,0001 Å) e o segundo fator a interpretação humana, baseada em bibliografia. As amostras foram analisadas utilizando duas metodologias distintas, descritas a seguir:

6.3.2.1.1 Rocha Total

O material passante na peneira de 250 mesh foi secado, desagregado usando gral e pistilo de ágata e então colocado em lâminas de vidro para ser prensado manualmente contra outra lâmina de vidro até que sua superfície estivesse regular. O resultado final é uma lâmina de vidro com material representativo de toda a fração menor do que 60 μm . As amostras são submetidas à análise por DRX durante um segundo a cada 0,02° medidos no goniômetro.

6.3.2.1.2 Amostra Orientada

A partir do material passante na peneira de 250 mesh, foi feita uma solução com água bideionizada. Essa solução passou por um aparelho orbitador no qual permaneceu por 24h com a finalidade de desagregar partículas (Figura 31A). Após, o mesmo material passou durante cinco minutos por uma ponteira de ultrassom para desagregar partículas menores. Posteriormente, as soluções das amostras foram colocadas numa vasilha de vidro onde tiveram suas temperaturas medidas. Utilizando a Lei de Stokes (Figura 31B), foram calculados os tempos de decantação para separação do material menor do que 4 μm . Os tempos calculados foram 1h22min53s. Passado esse tempo, o líquido sobrenadante, ou seja, aquele que continha os sedimentos menores do que 4 μm em suspensão, foi pipetado e depositado em lâminas de vidro (Figura 31C). Após a pipetagem, o material foi deixado em temperatura ambiente para que os minerais, especialmente os filossilicatos, fossem naturalmente orientados no processo de deposição na lâmina e o líquido secasse. Para cada amostra foram preparadas duas lâminas. Após o processo descrito acima, uma delas estava pronta para a análise, a chamada amostra natural. A amostra natural passou pelo difratômetro por dois segundos a cada 0,02° medidos no goniômetro. Uma vez analisada sob condições naturais, foi aplicado etilenoglicol na lâmina para estimular a expansão das distâncias interplanares dos minerais sensíveis ao processo a fim de que fossem melhor detectados e então foi novamente analisada, originando a chamada amostra glicolada. A amostra glicolada foi analisada por três segundos a

6 – METODOLOGIA

cada $0,02^\circ$ medidos no goniômetro. A segunda lâmina foi posta em um forno a 550°C e depois analisada por dois segundos a cada $0,02^\circ$ medidos no goniômetro, a chamada amostra calcinada. Portanto, as análises natural e glicolada foram feitas na mesma amostra sob condições diferentes.

Especialmente para este estudo optou-se por fazer também uma análise de amostra orientada com a solução do material menor do que $60\ \mu\text{m}$ sem a separação da fração menor do que $4\ \mu\text{m}$. Foi analisado, portanto, o mesmo material que em rocha total, porém com processo de pipetagem e orientação natural dos cristais.

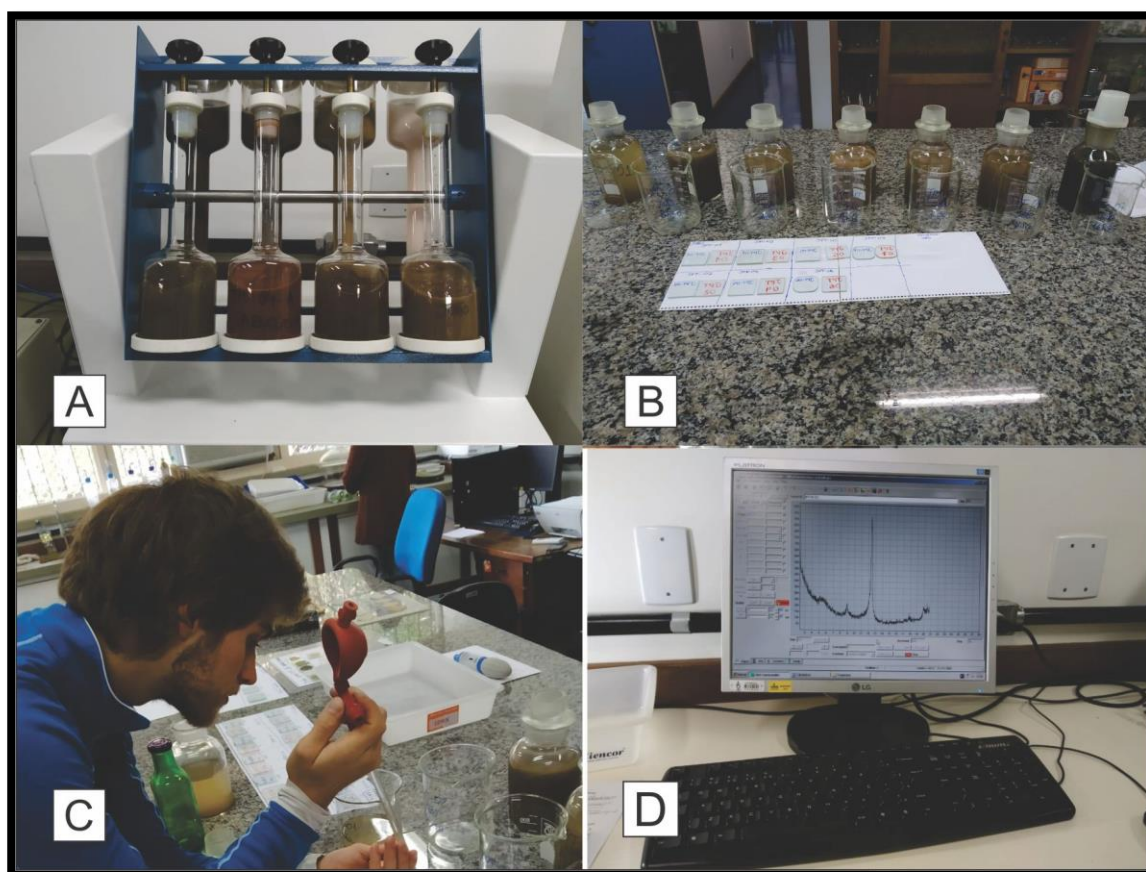


Figura 31: Em A, o processo de orbitação. Em B, cada uma das amostras passando pelo processo de decantação. Em C, o processo de pipetagem. Em D, o resultado em tempo real da análise.

6.3.2.2 *Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX)*

A etapa de estudo geoquímico é o momento no qual há a quantificação dos elementos que podem ser nocivos para o meio onde estão inseridos. Tendo em vista os objetivos e o escopo do projeto aliados com a acessibilidade de equipamentos, optou-se pela utilização da técnica de Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX). A escolha dessa técnica se deve a diversos fatores. Segundo Dutra e Gomes (1984), a fluorescência de raios-X conta com diversos fatores que a tornam muito utilizada. Dentre eles, destacam-se a facilidade da técnica com previsibilidade alta do comportamento dos elementos tornando a exatidão alta o que faz com que seja de boa reprodutibilidade. A sensibilidade é baixa (partes por milhão) quando comparada a outras técnicas como Espectrômetros de Massa, no entanto, é o suficiente para o que se propõe no Projeto Temático como Trabalho de Conclusão de Curso. O grande espectro de elementos possíveis de serem analisados e a possibilidade de analisar material líquido, sólido ou em pó tornam esta umas das técnicas analíticas mais versáteis na geologia, sendo, portanto, muito utilizada (Dutra e Gomes, 1984). Foi utilizado o equipamento Espectrômetro De Fluorescência de Raios X RIX 2000 da Rigaku.

A técnica de FRX consiste na irradiação da amostra com feixes de raios X. Isto causa a excitação dos elétrons mais externos da eletrosfera dos átomos presentes no material analisado levando à expulsão dos mesmos da eletrosfera (Dutra e Gomes, 1984). O processo da liberação de elétrons causa a emissão de energia e espectros de radiação. Em condições controladas, é possível identificar os elementos emissores de cada frequência dessa radiação, permitindo, além disso, quantificar, por meio da intensidade da radiação, a concentração deste elemento no material. O resultado da análise é parecido com o resultado da DRX, um diagrama com picos e vales, no qual o eixo das ordenadas corresponde ao número de contagens e o eixo das coordenadas à energia em keV. Com a análise prévia de parâmetros e a calibração da máquina com uma curva de leitura, é possível estimar a concentração dos elementos medidos. Os elementos maiores são medidos na forma de porcentagens em óxidos, enquanto os elementos traço são medidos em ppm.

6 – METODOLOGIA

Para os sedimentos de fundo, a metodologia utilizada na análise de FRX conta com a preparação de duas pastilhas. A primeira pastilha é a fundida (Figura 32C) e é preparada para a análise de elementos maiores. A preparação dela consiste na pesagem de um grama de amostra, depois adiciona-se o fundente composto por $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ para então fundir a aproximadamente 1200°C . Após a fusão, a pastilha é retirada do forno para ser resfriada com ar a temperatura ambiente. A segunda pastilha é a prensada (Figura 32A), feita com o objetivo de analisar elementos traços. A preparação dela é feita a partir da pesagem de cinco gramas de amostra combinadas com um grama de ácido bórico cristalino (Figura 32B) que terá o papel de ligar o material. A amostra é submetida à pressão para formar a pastilha.

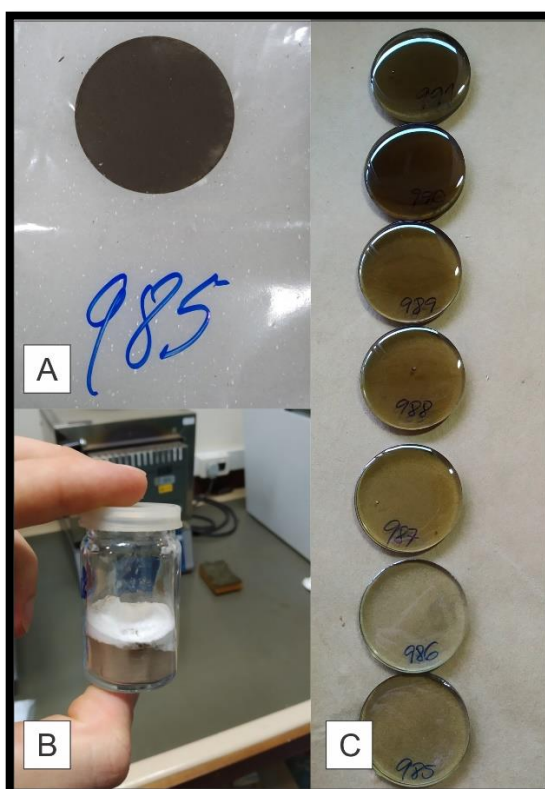


Figura 32: Em A, pastilha prensada. Em B mistura da amostra com ácido bórico cristalino (branco) para preparação da pastilha prensada. Em C, pastilhas fundidas.

Para os sedimentos em suspensão foi realizada a metodologia de análise de filmes finos, em desenvolvimento no Laboratório de Análise Química de Rochas do CPGq. Primeiramente, os filtros contendo o material foram colocados em um béquer

de 250 ml com aproximadamente 40 ml de água bideionizada. Após, o béquer foi colocado em um aparelho de ultrassom para que o material a ser analisado fosse liberado do filtro de papel. Com a ajuda de uma espátula de plástico, foi feita a raspagem leve desse material que foi posteriormente transferido para uma cápsula de vidro e então submetido a cinco minutos de centrifugação a 3000 rotações por minuto para que fosse concentrado. Após a concentração dos sedimentos, foi retirado o líquido sobrenadante para então pipetar o material de análise em lâminas de vidro, nas quais permaneceu até que secasse por completo e restasse apenas o material depositado. As lâminas foram analisadas na FRX com a técnica de filmes finos, sendo medidas as concentrações dos elementos menores e traços. Portanto, não houve preocupação na medição sistemática da concentração dos elementos maiores nos sedimentos de suspensão. Os erros associados às leituras pela FRX estão tabelados no capítulo 11.3 Anexo III.

6.4 Tratamento Estatístico dos Dados

O tratamento estatístico dos dados geoquímicos foi realizado com base em três diferentes índices (ou fatores) de análise ambiental. Estes consistem em analisar o grau de contaminação de determinado ambiente em relação a um elemento específico. Cada um deles tem a sua especificação e conceitos próprios que estão explicitados a seguir.

6.4.1 Fator de Enriquecimento (FE)

O Fator de Enriquecimento (FE) é uma ferramenta importante no entendimento das concentrações dos elementos em relação a um *background*. Primeiramente foi proposto por Gresens (1967) para o estudo do metassomatismo. Duce *et al.* (1975) propuseram o conceito de fator de enriquecimento para o estudo da contaminação química atmosférica. Segundo os autores, utilizando um elemento de referência seria possível avaliar a importância da contribuição de algum ambiente para a composição química de outro. No estudo em questão, os autores desejavam avaliar a contribuição

dos sais marinhos e da crosta continental para a contaminação da atmosfera. Sendo assim escolheram dois elementos que fossem considerados de referência para cada um desses ambientes. O sódio foi escolhido para o oceano, enquanto o alumínio foi considerado como elemento referência para a crosta, aplicando a seguinte equação para o FE:

$$FE = \left(\frac{[Xe]_{am} \div [Er]_{am}}{[Xe]_{bg} \div [Er]_{bg}} \right)$$

Onde, $[Xe]_{am}$ e $[Xe]_{bg}$ são as concentrações do elemento que se quer analisar na amostra e no *background* respectivamente. $[Er]_{am}$ e $[Er]_{bg}$ são as concentrações dos elementos referência na amostra e no *background* respectivamente. A discussão sobre qual elemento utilizar como referência é extensa. O elemento deve ser imóvel, deve ter pouca variação na sua ocorrência e aparecer em quantidades de elemento traço no ambiente de estudo (Loska *et al.*, 2003). Na literatura aparecem alguns elementos estudados, são eles o lítio (Silva *et al.*, 2006; Loring, D.H., 1990), o escândio (Bergamaschl *et al.*, 2002; Mortatti *et al.*, 2010), o alumínio (Siqueira e Aprile, 2013; Woitke *et al.*, 2003; Datta e Subramanian, 1998; Duce *et al.*, 1975) e o titânio (Quevauviller *et al.*, 1989; Pacyna e Winchester, 1990). Para o presente estudo, optou-se por utilizar como elemento de referência o titânio. Esta escolha foi baseada nos parâmetros supracitados. O elemento ocorre em concentrações baixas (entre 0,7% e 0,8%) e constantes em todos os pontos amostrados, bem como tem mobilidade baixa.

Segundo Birth (2003) *apud* Chen *et al.* (2007), os resultados para o FE podem ser divididos em sete classes, são elas (Quadro 1):

Classes do FE	Qualidade dos Sedimentos
<1	Deficiência de Enriquecimento
< 3	Enriquecimento Leve
3 – 5	Enriquecimento Moderado
5 – 10	Enriquecimento Severo Moderado
10 – 25	Enriquecimento Severo
25 – 50	Enriquecimento Muito Severo
> 50	Enriquecimento Severo Extremo

Quadro 1: Classes de divisão para o Fator de Enriquecimento, segundo Birth (2003) apud Chen et al. (2007).

6.4.2 Fator de Contaminação (FC)

Primeiramente proposto por Hakanson (1980), o fator de contaminação visa facilitar o entendimento da contaminação em determinado corpo d'água. O conceito é dado pela equação:

$$FC = \left(\frac{C_{0-1}^i}{Cb} \right)$$

Onde, C_{0-1}^i é a média da concentração do elemento de interesse nas amostras analisadas (pelo menos cinco amostras) e Cb é a concentração do elemento em questão num *background* ou valor proposto como de referência denominado “pré-industrial”. A proposição de se utilizar um valor pré-industrial como referência de *background* é interessante, porém com a falta de dados aprofundados sobre as concentrações pré-industriais na área de interesse, optou-se pela utilização do Cb com valores do ponto considerado como *background* para o presente trabalho. Hakanson (1980) separou os possíveis resultados para o FC em quatro classes (Quadro 2).

Classes do FC	Qualidade dos Sedimentos
< 1	Baixa Contaminação
1 e 3	Contaminação Moderada
3 e 6	Contaminação Considerável
> 6	Alta Contaminação

Quadro 2: Classes propostas por Hakanson (1980) e as qualidades dos sedimentos em relação à contaminação.

6.4.3 Índice de Geoacumulação (Igeo)

O Índice de Geoacumulação (Igeo) foi proposto na década de 1960 por Muller (1969). A equação para calcular o índice é dada por:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5B_g}$$

Onde C_n é a concentração do elemento de interesse e B_g é a concentração do mesmo elemento em um *background*. Assim como para o FC, também podem ser usados valores pré-industriais como background caso os mesmos estejam disponíveis ou passíveis de serem adquiridos. Neste trabalho serão utilizados dados de um ponto escolhido como *background*. O valor de 1,5 nessa fórmula tem a função de permitir que se analisem variações naturais no conteúdo do elemento que está sendo alvo do estudo, bem como permite que sejam observadas contribuições antropogênicas (Yaqin *et al.* 2008; Loska *et al.* 1997). De acordo com Loska *et al.* (1997), Muller (1981) separou os possíveis resultados em seis classes distintas para a avaliação do índice e do nível de contaminação (Quadro 3).

Classes do IGEO	Nível de Contaminação
IGEO < 0	Não poluído
0 < IGEO < 1	Não poluído a poluído
1 < IGEO < 2	Moderadamente poluído
2 < IGEO < 3	Moderadamente a fortemente poluído
3 < IGEO < 4	Fortemente poluído
4 < IGEO < 5	Fortemente a extremamente poluído
IGEO > 5	Extremamente poluído

Quadro 3: Classificação do Igeo e dos níveis de contaminação segundo Muller et al. (1981).

7 RESULTADOS

7.1 Arroio Candiota

7.1.1 Granulometria

Os resultados para a análise granulométrica relativa aos sedimentos de fundo dos pontos que compõem o Arroio Candiota (PTs 01, 02 e 03) estão discriminados a seguir (Figura 33 e Tabela 6).

O PT – 01 está localizado no Arroio Sanga Funda, afluente do Arroio Candiota e a nordeste das atividades de mineração e da termelétrica. Sua granulometria aponta para uma abundância de partículas desde os tamanhos areia muito grossa (de 1mm a 2mm) até grânulo a seixo (2mm a 16mm). Os pontos 02 e 03 estão localizados no Arroio Candiota e apresentam características granulométricas semelhantes. As partículas correspondentes à areia fina até grânulo são encontradas em abundância. No entanto, o conteúdo de finos (<63 μ m) do PT – 02 é discrepante do PT – 03 (Tabela 6), embora estejam localizados muito próximos

7 – RESULTADOS

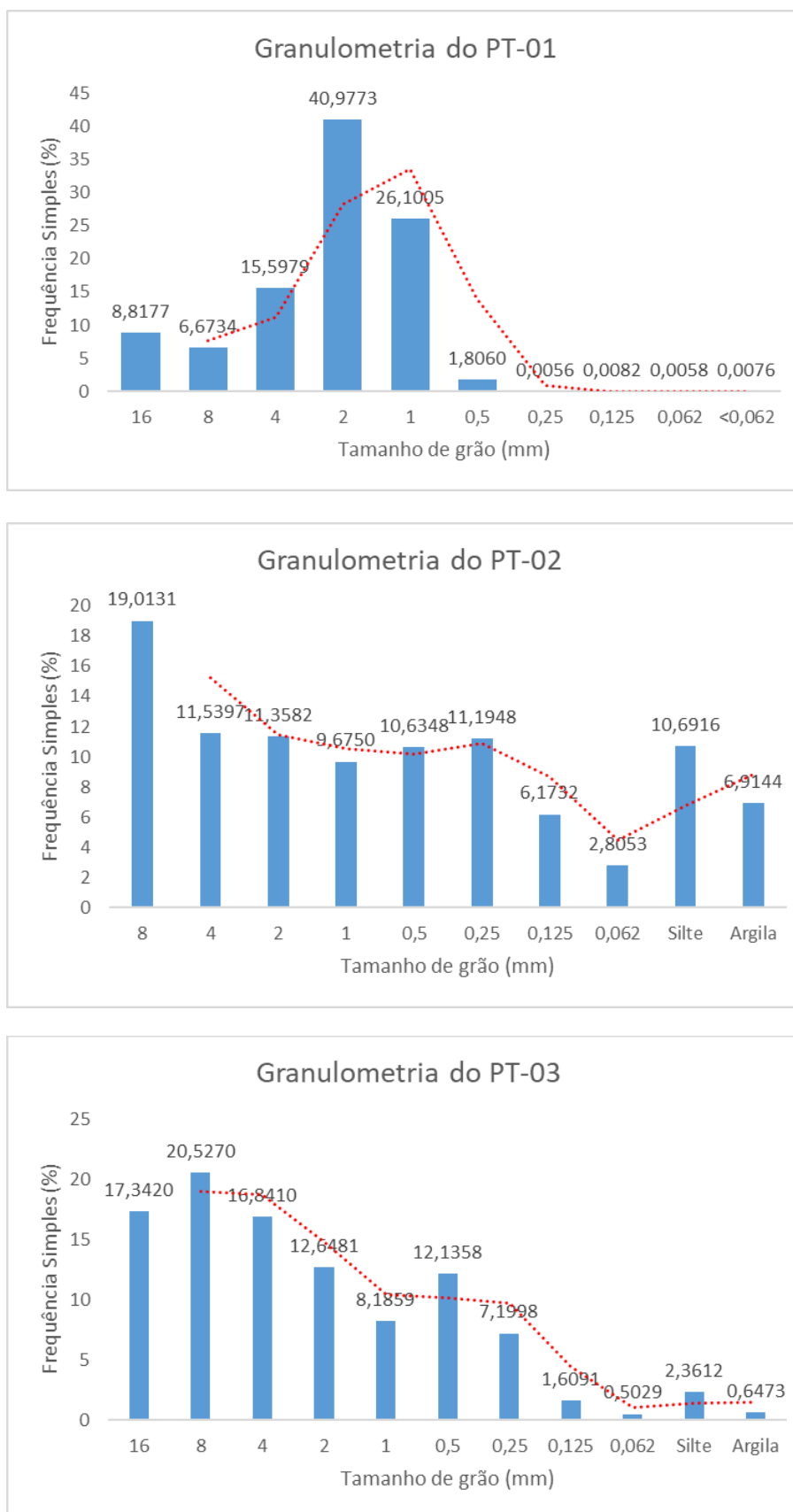


Figura 33: Dados de granulometria para os pontos 01, 02 e 03. Os valores indicados nas barras dos histogramas correspondem aos teores em porcentagem das respectivas frações granulométricas.

7 – RESULTADOS

Tabela 6: Tabela de conteúdo de sedimentos finos em gramas e porcentagem para cada ponto de amostragem do Arroio Candiota e Sanga Funda.

Ponto de Amostragem	Conteúdo de Finos (g)	Conteúdo de Finos (%)
PT – 01	0,0117	0,0076
PT – 02	16,78	17,6
PT – 03	5,81	3,01

Na Tabela 6 é possível observar a grande variação de conteúdo de sedimentos finos entre os pontos amostrados e analisados. O incremento de 17% entre o PT – 01 e o PT – 02 seguido da queda de aproximadamente 14% entre o PT – 02 e o PT – 03 indicam que no local há uma variabilidade sedimentológica abrupta, como será discutido no capítulo 8.

7.1.2 Mineralogia – DRX

7.1.2.1 Rocha Total (RT)

O difratograma para a metodologia de RT dos pontos 01, 02 e 03 está exposto a seguir (Figura 34). A DRX foi apenas aplicada aos sedimentos de fundo.

Observa-se, pela análise de RT, que o Arroio Candiota contém nos seus sedimentos de fundo argilominerais expansivos facilmente identificáveis, como pode ser observado na Figura 34 pelos picos em 14.585 Å. No mesmo pico primário aparece também a clorita, com pico secundário em 7,09 Å e terciário em 4,44 Å. Os minerais do grupo da mica aparecem como picos discretos na faixa dos 10 Å em todos os pontos analisados e em alguns pontos com picos secundários bastante discretos em 4.9 Å. A caulinita, com pico principal em 7.1 Å, secundário em 4.4 Å e terciário em 3.565 Å está presente em todos os pontos analisados. Quartzo e feldspato aparecem com vários picos em todos os pontos analisados. O PT – 03 apresenta dois picos distintos dos demais pontos. Em 9.29 Å, o pico principal do talco aparece. Seu pico secundário, em 3.12 Å, aparece discretamente. Outra distinção do PT – 03 em relação aos demais é a existência de dois picos identificados como calcita, o primeiro em 3.02 Å e o segundo em 2 Å.

7 – RESULTADOS
Arroio Candiota

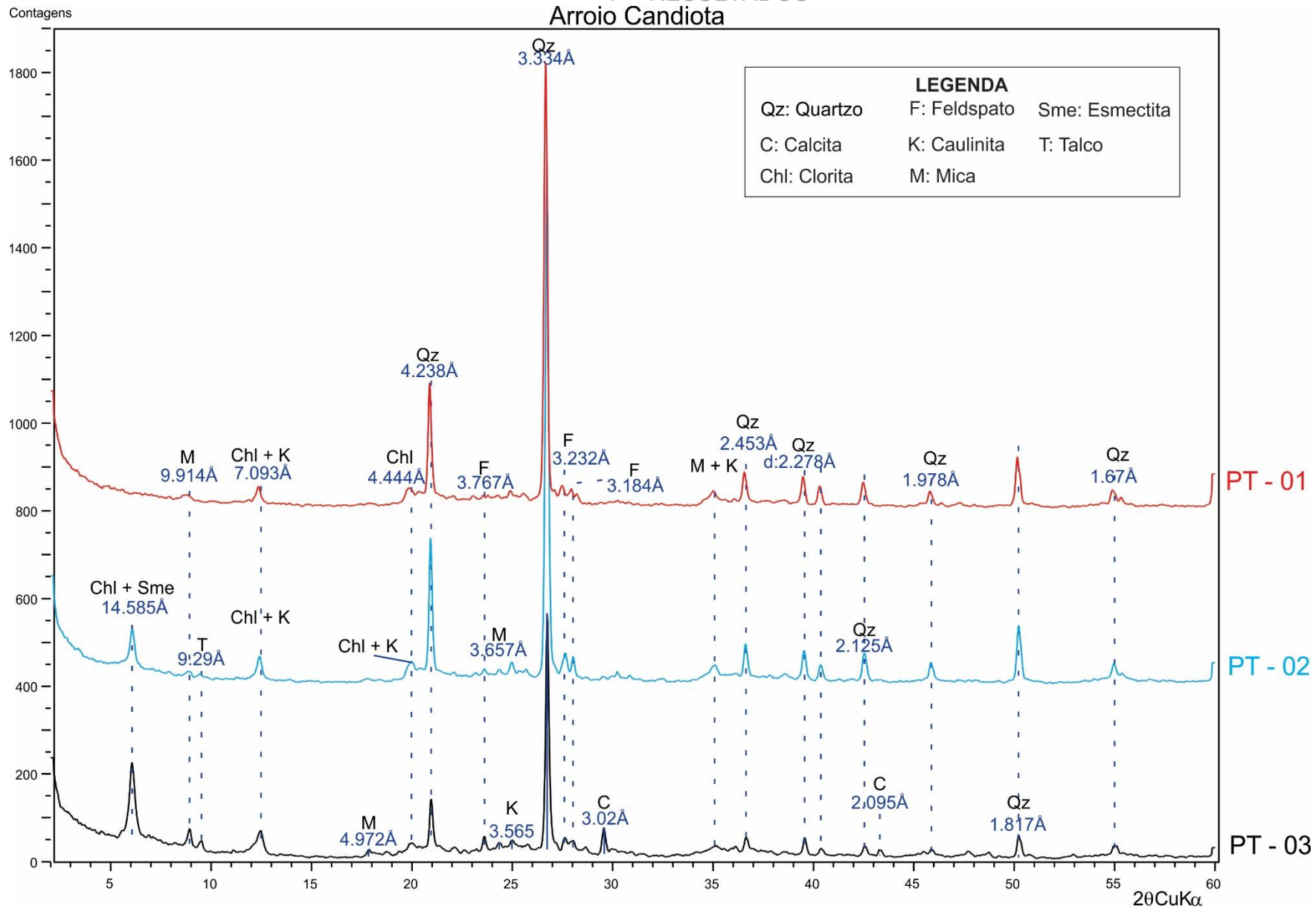


Figura 34: Difratogramas de RT dos pontos representativos do Arroio Sanga Funda (PT - 01) e Candiota (PT - 02 e PT - 03).

7 – RESULTADOS

7.1.2.2 Amostra Orientada (fração <math><4 \mu\text{m}</math>)

As análises das amostras orientadas permitiram um refinamento nos dados referentes a ocorrência de argilominerais nos pontos amostrados. Os difratogramas são mostrados a seguir (Figura 35, Figura 36 e Figura 37).

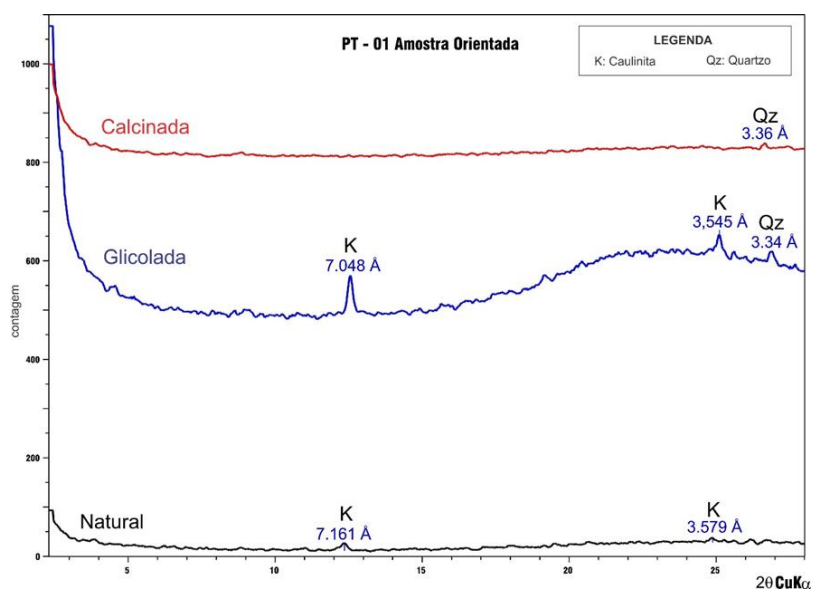


Figura 35: Difratograma de amostra orientada do PT – 01.

Como é possível constatar na Figura 35, o PT – 01 tem ocorrência limitada de argilominerais. Apenas estão presentes na fase menor do que $4 \mu\text{m}$ os minerais caulinita e o quartzo, sendo a caulinita o único argilomineral detectado pela técnica.

7 – RESULTADOS

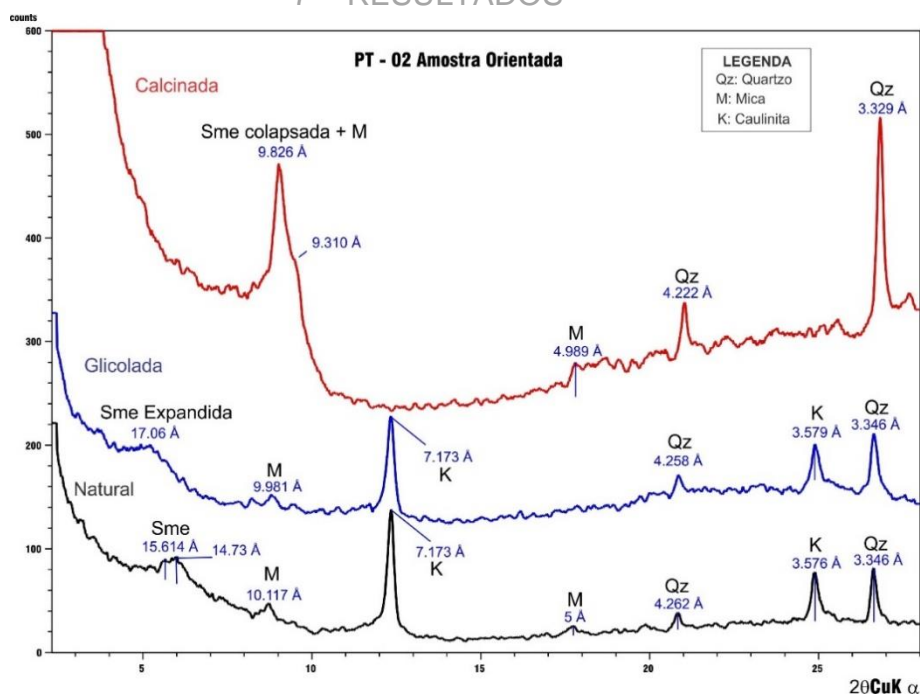


Figura 36: Difratoograma de amostra orientada do PT – 02.

A Figura 36 indica que o PT – 02 tem ocorrência de uma maior variedade de minerais em comparação com o PT – 01. Além da caulinita e do quartzo, estão presentes também a esmectita (pico entre 14 Å e 16 Å) e a mica (indiferenciável pela resolução da análise) com pico em 10 Å e 5 Å.

O PT – 03, como indicado a seguir na Figura 37, além do quartzo, esmectita, caulinita e mica, ainda conta com a presença de picos do mineral talco em 9.3 Å e vermiculita em 14 Å.

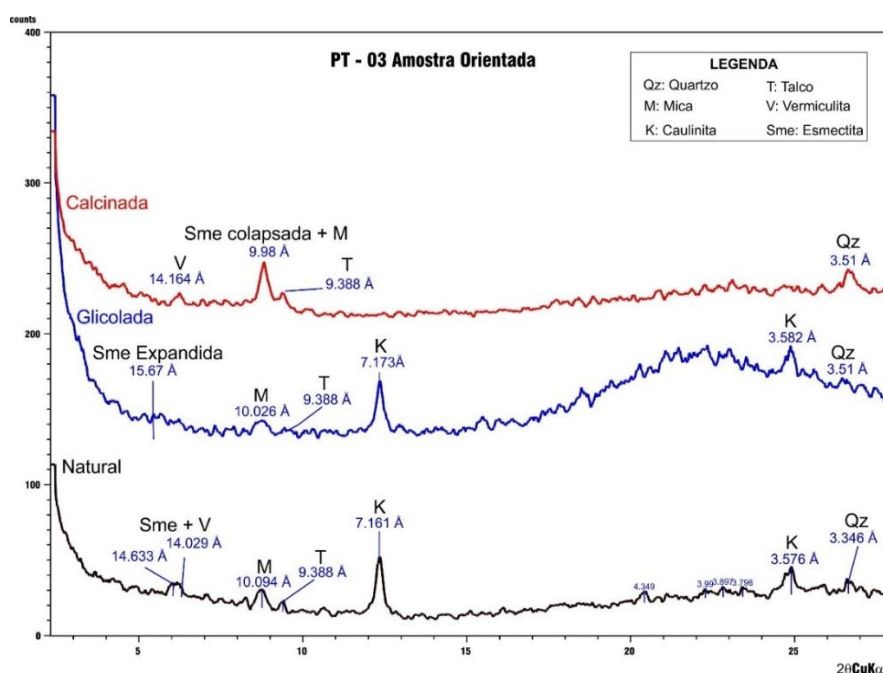


Figura 37: Difratoograma de amostra orientada do PT – 03.

7 – RESULTADOS

7.1.3 Geoquímica – FRX

7.1.3.1 Sedimentos de Fundo

7.1.3.1.1 Elementos Maiores

A Tabela 7 ilustra as concentrações para os elementos maiores nos sedimentos de fundo do Arroio Candiota. As concentrações são medidas em porcentagem de óxidos.

Tabela 7: Concentração dos elementos maiores nos sedimentos de fundo do Arroio Candiota. Nd = não detectado. LOI = Perda ao Fogo (Loss of Ignition). Os teores dos elementos são expressos em porcentagem (%) de óxidos.

Elementos	PT – 01	PT – 02	PT – 03
SiO ₂	68,34	67,71	54,54
Al ₂ O ₃	11,87	14,40	15,56
TiO ₂	0,73	0,88	0,86
Fe ₂ O ₃	5,27	4,82	7,23
MnO	1,27	0,11	0,52
MgO	0,42	1,04	3,63
CaO	0,36	1,01	4,30
Na ₂ O	Nd	Nd	Nd
K ₂ O	2,13	1,86	2,18
P ₂ O ₅	0,13	0,08	0,14
LOI	9,49	8,43	11,05
Total	100,01	100,33	100,01

Analisando a Tabela 7, é possível identificar tendências nas concentrações de alguns elementos. A sílica (SiO₂) tem a tendência de ser mais concentrada naqueles pontos próximos à cabeceira do arroio, enquanto os pontos a jusante apresentam concentrações cada vez menores. Por outro lado, o alumínio, o magnésio e o cálcio têm comportamento distinto apresentando enriquecimento em relação aos pontos a montante. A tabela a seguir contém os resultados calculados dos índices geoquímicos para os elementos maiores (Tabela 8).

7 – RESULTADOS

Tabela 8: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos 02 e 03.

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
SiO ₂	0,82	0,99	-0,59	0,68	0,99	-0,91
Al ₂ O ₃	1,006	1,21	-0,30	1,11	1,31	-0,19
Fe ₂ O ₃	0,76	0,91	-0,71	1,16	1,37	-0,12
MnO	0,07	0,08	-4,11	0,35	0,41	-1,87
MgO	2,05	2,47	0,72	7,34	8,64	2,53
CaO	2,32	2,805	0,90	10,14	11,94	2,99

Os valores contidos na tabela acima são expressos em gráficos para melhor visualização a seguir (Figura 38).

7 – RESULTADOS

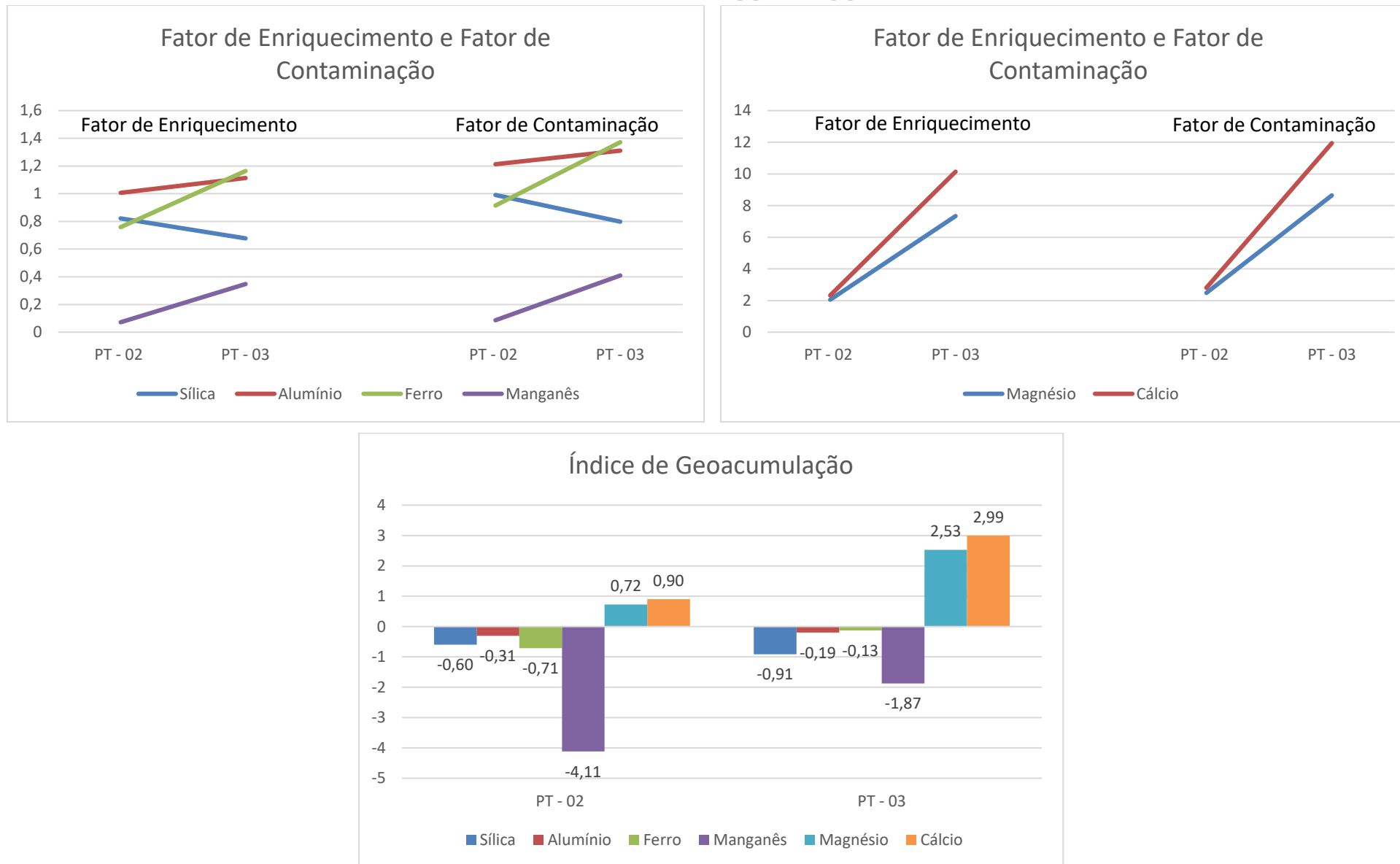


Figura 38: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos maiores do Arroio Candiota (referência PT – 01).

7 – RESULTADOS

Os resultados expressos na Figura 38 e na Tabela 8 confirmam as tendências observadas nas concentrações dos elementos distribuídos nos pontos de amostragem. Confirmando o decréscimo de sílica na composição conforme se avança em direção à foz da drenagem, bem como o enriquecimento em ferro, alumínio, manganês, magnésio e cálcio. Apesar de elementos como o manganês apresentarem resultados de FE e FC menores do que a unidade - considerada como condição de não enriquecimento e não empobrecimento -, é possível observar a tendência de aumento na sua concentração do PT – 02 para o PT – 03.

O Quadro 4 contém as classificações propostas para os índices geoquímicos aplicadas aos resultados obtidos para esses cálculos. No PT – 02 os únicos elementos que apresentam valores de FE e FC acima de um, ou seja, enriquecidos em relação ao *background*, são o alumínio, o magnésio e o cálcio. Estes foram classificados como levemente enriquecidos e com contaminação moderada. Para o Igeo, os valores destes elementos são considerados não poluídos a poluídos, tendo os resultados ficado entre zero e um. O restante dos elementos, tanto para o FC e FE, como para o Igeo apresentaram valores que representam o não enriquecimento, ou empobrecimento, em relação ao *background*. Estes valores no FC e no FE são abaixo de um, enquanto que no Igeo, abaixo de zero. O cenário para o PT – 03 muda. Os elementos considerados empobrecidos para os três índices são o silício e o manganês. O alumínio e o ferro foram classificados como levemente enriquecidos e com contaminação moderada, pelo FE e FC, respectivamente. No entanto, a classificação do Igeo para esses elementos é de não poluídos. Os resultados obtidos para o cálcio e o magnésio no PT – 03 são os que mais chamam atenção. As classificações de FE e FC são, respectivamente, enriquecimento severo moderado com alta contaminação para o magnésio e enriquecimento severo com alta contaminação para o cálcio. O cálcio está em concentração até dez vezes maior do que no *background*, enquanto o magnésio está em concentração sete vezes maior. Segundo o Igeo, ambos elementos podem ser classificados como moderadamente a fortemente poluídos.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
SiO ₂	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Al ₂ O ₃	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Fe ₂ O ₃	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
MnO	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
MgO	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Enriquecimento Severo Moderado	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído
CaO	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Enriquecimento Severo	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído

Quadro 4: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos representantes do Arroio Candiota.

7 – RESULTADOS

7.1.3.1.2 Elementos Menores e Traços

As concentrações dos elementos menores e traços nas amostras de sedimentos de fundo do Arroio Candiota são apresentadas na Tabela 9 em partes por milhão (ppm).

Tabela 9: Concentração dos elementos menores e traços em ppm nos pontos amostrados dos sedimentos de fundo do Arroio Candiota

Elementos	PT – 01	PT – 02	PT – 03
Cr	46	50,2	82,8
Ba	1352	576,5	914,7
Rb	96,9	116,1	105,7
Ga	12,8	16,2	17,4
U	4	5,1	2,2
Pb	0	0	0
As	46,2	34,3	35,3
Y	48,6	60	58,8
Co	34,7	8,3	13,9
Ni	36,2	20,8	42,5
Cu	103,8	40,7	74,1
S	1360,3	578,1	757,6
Cd	0	0	0
V	88,4	90,6	107,1
Mo	0	0	0
Zn	71,5	55,2	109,6

De acordo com a Tabela 9 é possível observar a tendência de aumento na concentração de montante a jusante para os seguintes elementos: Cr, Ga e Vanádio. Enquanto isso, elementos como arsênio tendem a demonstrar um comportamento contrário, estando mais empobrecidos a jusante. Elementos importantes no estudo da contaminação de carvão como o enxofre e o cobre não apresentam nenhuma tendência clara. Ressalta-se que o enxofre está em concentrações elevadas no ponto considerado *background* e que o chumbo não foi detectado pelas análises. Na tabela a seguir são colocados os valores calculados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores.

7 – RESULTADOS

Tabela 10: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de fundo dos pontos 02 e 03.

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Cr	0,905	1,09	-0,46	1,53	1,8	0,26
Ba	0,35	0,43	-1,81	0,57	0,68	-1,14
Rb	0,99	1,20	-0,32	0,925	1,09	-0,46
Ga	1,05	1,265	-0,245	1,15	1,36	-0,14
U	1,06	1,275	-0,23	0,466	0,55	-1,44
Pb	-	-	-	-	-	-
As	0,615	0,74	-1,01	0,65	0,76	-0,97
Y	1,02	1,23	-0,28	1,03	1,21	-0,31
Co	0,20	0,24	-2,65	0,34	0,40	-1,90
Ni	0,48	0,57	-1,38	0,996	1,17	-0,35
Cu	0,325	0,39	-1,935	0,605	0,71	-1,07
S	0,35	0,42	-1,82	0,47	0,56	-1,43
Cd	-	-	-	-	-	-
V	0,85	1,02	-0,55	1,02	1,21	-0,31
Mo	-	-	-	-	-	-
Zn	0,64	0,77	-0,96	1,30	1,53	0,03

Os valores expressos na Tabela 10, são apresentados a seguir por meio de gráficos para melhor entendimento (Figura 39).

7 – RESULTADOS

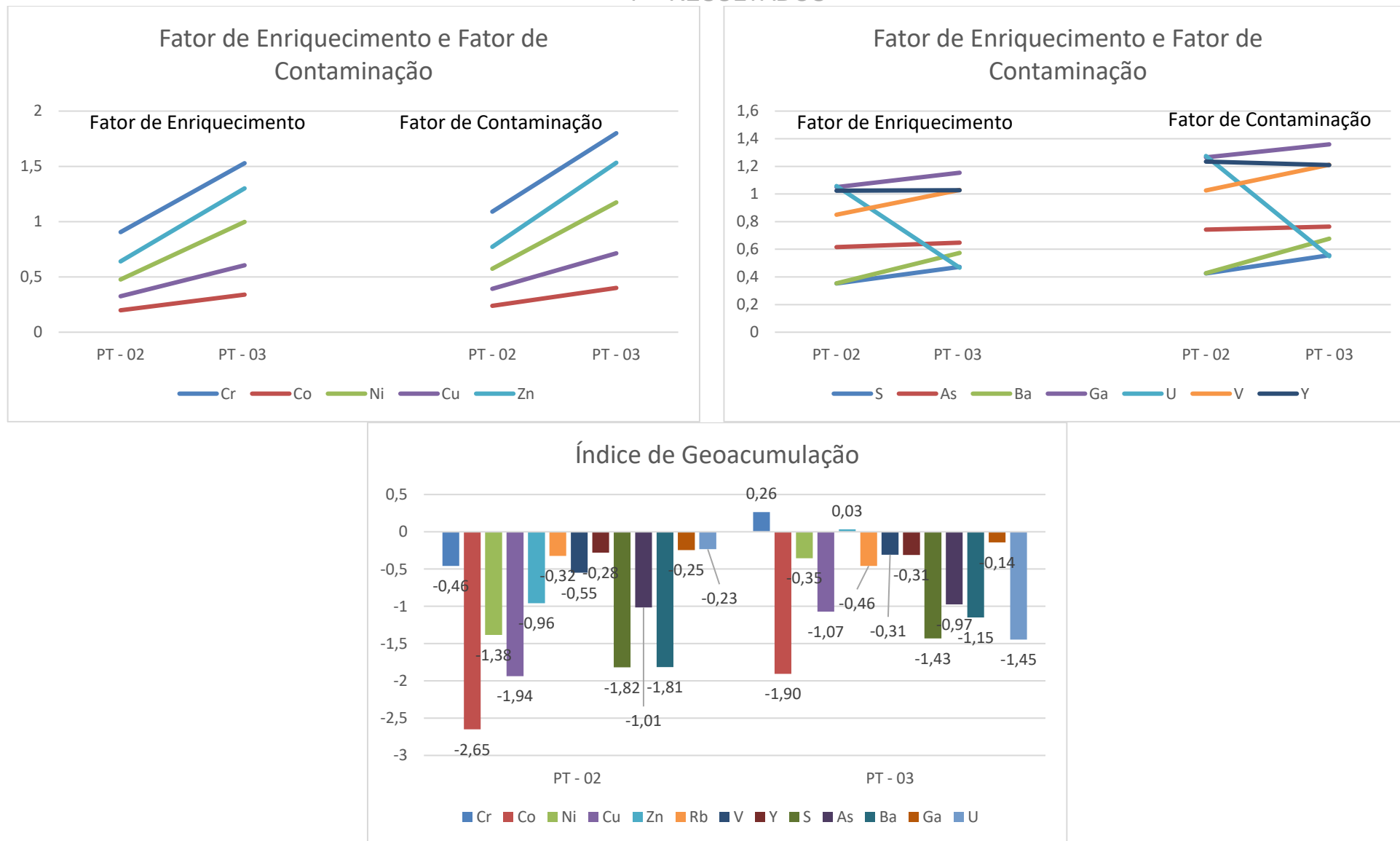


Figura 39: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos menores e traços do sedimento de fundo do Arroio Candiota.

7 – RESULTADOS

Os gráficos representados na Figura 39 indicam que a maioria dos elementos analisados tem a tendência de enriquecer à medida que se avança em direção à foz, com exceção do Urânio. Analisando a concentração absoluta de diversos elementos, é possível identificar a tendência de empobrecer em direção à jusante (e.g. arsênio), porém nos resultados dos índices geoquímicos a tendência é de enriquecimento para o mesmo elemento. Esse comportamento pode ser explicado pela maior concentração do elemento no ponto considerado *background* e também pela mais alta concentração do PT – 03 em relação ao PT – 02, mesmo que nestes sejam mais baixas que o PT – 01.

O Quadro 5 e o Quadro 6, a seguir, contêm as classificações dos índices geoquímicos para cada elemento menor e traço analisados. A partir dos resultados nelas apresentados, é possível observar que no PT – 02 os elementos Cr, Ba, As, Co, Ni, Cu, S e Zn são classificados com deficiência de enriquecimento, baixa contaminação e não poluídos. O Rb e o V são classificados como deficiência em enriquecimento, contaminação moderada e não poluídos. Já os elementos Ga, U e Y estão com enriquecimento leve, contaminação moderada e não poluídos. Para o PT – 03 é possível identificar as tendências de enriquecimento em alguns elementos. Tais tendências são observáveis nos elementos Cr e Zn que têm classificações de enriquecimento leve, contaminação moderada e, pelo Igeo, estão poluídos a não poluídos. Também podem ser observadas para o Ni e para o V, que passam a ser classificados como deficiência em enriquecimento, contaminação moderada e não poluído e como enriquecimento leve, contaminação moderada e não poluído, respectivamente, indicando tendência ao enriquecimento. O Ba, o Rb, o Ga, o As, o Y, o Co, o Cu e o S permanecem com as mesmas classificações que no PT – 02. O urânio é o elemento que tem tendência de empobrecimento do PT – 02 para o PT – 03, sendo classificado neste como deficiência de enriquecimento, baixa contaminação e não poluído.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Cr	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Ba	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Rb	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
Ga	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
U	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
As	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído

Quadro 5: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos representantes do Arroio Candiota Parte 1.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Y	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Co	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Ni	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
Cu	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
S	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
V	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Zn	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído

Quadro 6: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos representativos do Arroio Candiota Parte 2.

7 – RESULTADOS

7.1.3.2 Sedimentos de Suspensão

Na Tabela 11 são apresentados os resultados das concentrações dos elementos menores e traços para os sedimentos de suspensão do Arroio Candiota.

Tabela 11: Concentração dos elementos menores e traços em ppm nos pontos amostrados dos sedimentos de suspensão do Arroio Candiota.

Elementos	PT – 01	PT – 02	PT – 03
Cr	4,9	40	32,3
Ba	2425	40854,6	1405,7
Rb	7	42,6	0
Ga	0	0	0
U	0	0,4	0
Pb	14,1	26,3	3,1
As	4,7	5,2	0
Y	28,9	55,7	14,1
Co	0,1	0,5	0,1
Ni	10,4	10,9	11,2
Cu	27,2	29,9	76,1
S	584	312,1	493,4
Cd	1,5	1,4	1,4
V	2,3	16,5	5,1
Mo	0	0	0
Zn	1004,1	24692,7	622,2
Fe ₂ O ₃	5090	21670	3730
MnO	280	870	360
TiO ₂	150	0	200

Os dados apresentados na Tabela 11 indicam uma tendência similar no comportamento dos elementos Cr, Ba, Rb, Pb, Y, V, Zn, Fe e Mn tendendo a terem suas concentrações muito mais altas no PT – 02 do que nos pontos 01 e 03. Por outro lado, elementos como titânio e o enxofre têm tendências opostas, sendo empobrecidos no PT – 02 em comparação com os outros pontos. O cádmio tem concentrações parecidas nos três pontos. Já o arsênio tem concentrações parecidas no PT – 01 e PT – 02, não tendo sido detectado no PT – 03. O cobre, diferentemente

7 – RESULTADOS

dos outros pontos, tem tendência em enriquecer conforme se avança em direção à foz da drenagem.

Os gráficos da Figura 40 explicitam o comportamento semelhante dos elementos em questão. Todos possuem concentrações muito maiores no PT – 02 em relação aos demais pontos.

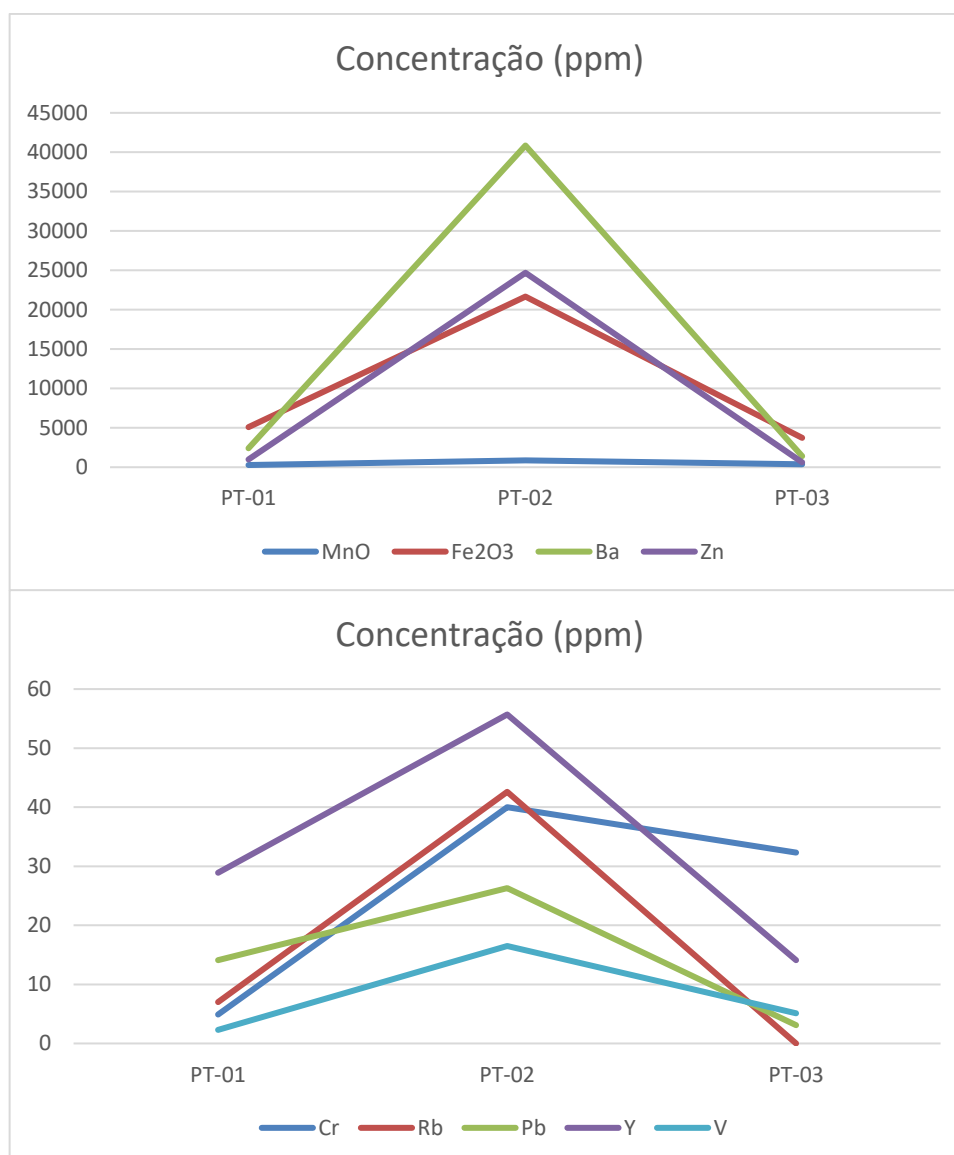


Figura 40: Concentração dos elementos Mn, Fe, Ba, Zn, Cr, Rb, Pb, Y e V nos sedimentos de suspensão do Arroio Candiota.

As tabelas a seguir (Tabela 12, Quadro 7 e Quadro 8) contêm os resultados obtidos através dos cálculos dos índices geoquímicos e suas respectivas classificações.

7 – RESULTADOS

Tabela 12: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de suspensão dos pontos 02 e 03.

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
MnO	2,66	3,11	1,05	0,96	1,285	-0,22
Fe ₂ O ₃	3,65	4,257	1,505	0,55	0,73	-1,03
Cr	6,997	8,16	2,44	4,94	6,59	2,135
Ba	14,44	16,85	3,49	0,43	0,58	-1,37
Rb	5,22	6,085	2,02	0	0	-
Ga	-	-	-	-	-	-
U	-	-	-	-	-	-
Pb	1,598	1,865	0,31	0,16	0,22	-2,77
As	0,95	1,11	-0,44	0	0	-
Y	1,65	1,93	0,36	0,37	0,49	-1,62
Co	4,285	5	1,74	0,75	1	-0,58
Ni	0,898	1,05	-0,52	0,81	1,08	-0,48
Cu	0,94	1,10	-0,45	2,098	2,797	0,899
S	0,458	0,53	-1,49	0,63	0,84	-0,83
Cd	0,8	0,93	-0,68	0,7	0,93	-0,68
V	6,15	7,17	2,26	1,66	2,22	0,56
Mo	-	-	-	-	-	-
Zn	21,08	24,59	4,035	0,465	0,62	-1,275

Os dados acima apresentados reforçam a ideia de que há maior concentração de parte dos elementos no PT – 02. Ressalta-se que diversos elementos têm resultados bastante acima do que é considerado o valor do *background*, indicando que estão em altas concentrações relativas ao PT – 01. Alguns elementos também estão enriquecidos no PT – 03.

Os quadros (Quadro 7 e Quadro 8) a seguir contêm as classificações de cada elemento em cada ponto para cada índice geoquímico calculado.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
MnO	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada a Considerável	Moderadamente Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
Fe ₂ O ₃	Enriquecimento Moderado	Contaminação Considerável	Moderadamente Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Cr	Enriquecimento Severo Moderado	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído	Enriquecimento Moderado	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído
Ba	Enriquecimento Severo	Alta Contaminação	Fortemente Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Rb	Enriquecimento Severo Moderado	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Pb	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
As	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação a Moderada	Não Poluído	Não detectado	Não detectado	Não detectado

Quadro 7: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos representantes do Arroio Candiota Parte 1.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 02			PT – 03		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Y	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Co	Enriquecimento Moderado	Contaminação Considerável	Moderadamente Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Ni	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação a Moderada	Não Poluído
Cu	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
S	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Cd	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
V	Enriquecimento Severo Moderado	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Zn	Enriquecimento Severo	Alta Contaminação	Fortemente a Extremamente Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído

Quadro 8: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos representantes do Arroio Candiota Parte 2.

7 – RESULTADOS

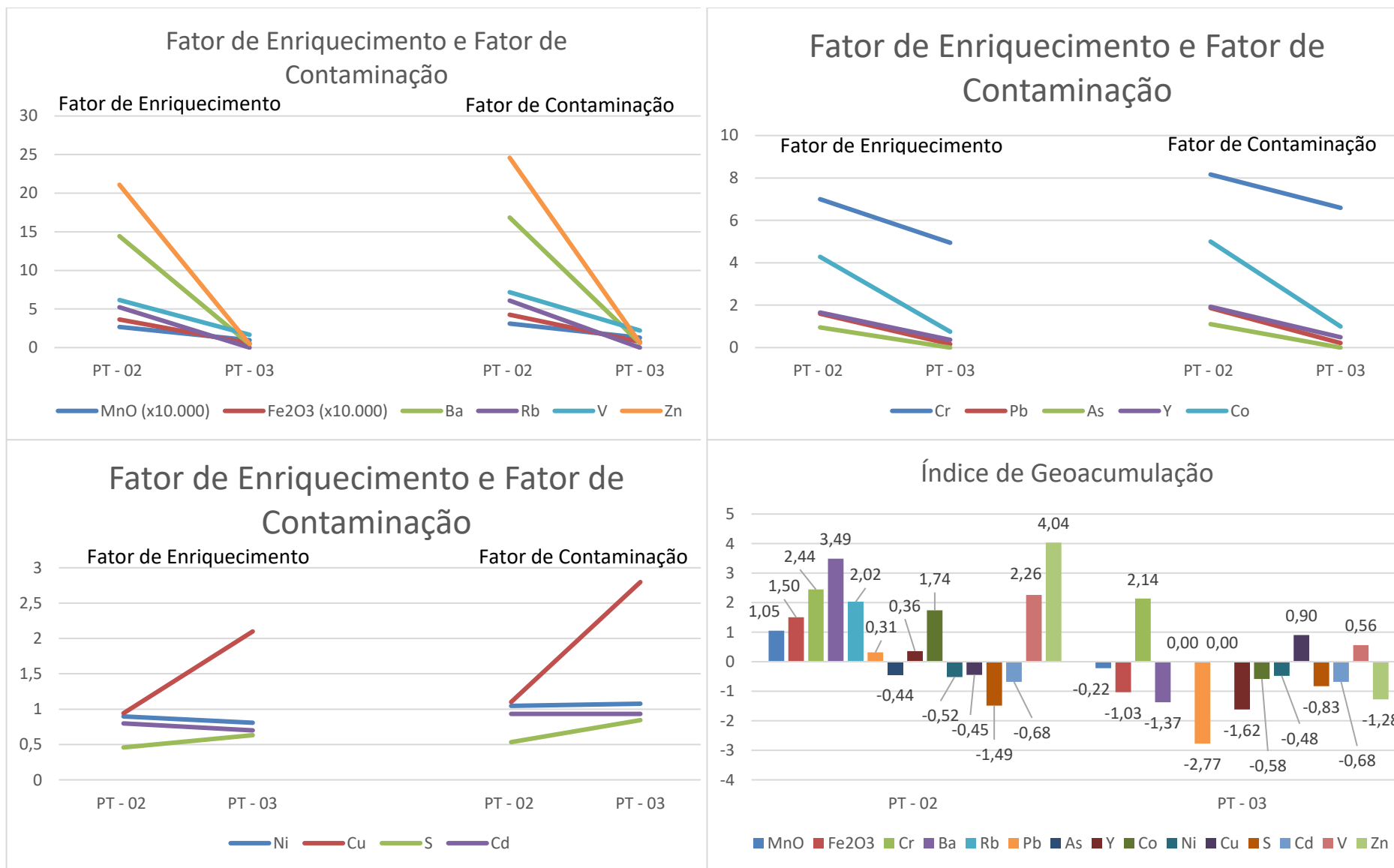


Figura 41: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos menores e traços do sedimento de suspensão do Arroio Candiota.

7 – RESULTADOS

Como pode ser observado nos quadros Quadro 7 e Quadro 8 e na Figura 41, diversos elementos estão com enriquecimentos relativos altos. No PT – 02, os elementos Ba, Rb, Cr, V e Zn apresentam os maiores valores. Já o manganês, ferro e o cobalto são classificados com enriquecimento moderado. Pb, As, Y, Cu, S e Cd não estão em concentrações altas e são classificados como não poluídos, baixa contaminação a moderada e deficiência de enriquecimento a enriquecimento leve. No PT – 03, observa-se que os elementos antes considerados altamente enriquecidos, agora têm suas concentrações bastante reduzidas. A Figura 41 ilustra essa situação. Os elementos apresentam uma tendência de decréscimo do PT – 02 para o PT – 03. O níquel e o cádmio tendem a manter uma estabilidade entre os dois pontos, enquanto o S e o Cu apresentam tendência de enriquecimento, sendo este enriquecido em mais de duas vezes.

7.2 Arroio Poacá

7.2.1 Granulometria

As análises granulométricas dos pontos do Arroio Poacá podem ser observadas a seguir (Figura 42), bem como os seus conteúdos de finos (Tabela 13).

7 – RESULTADOS

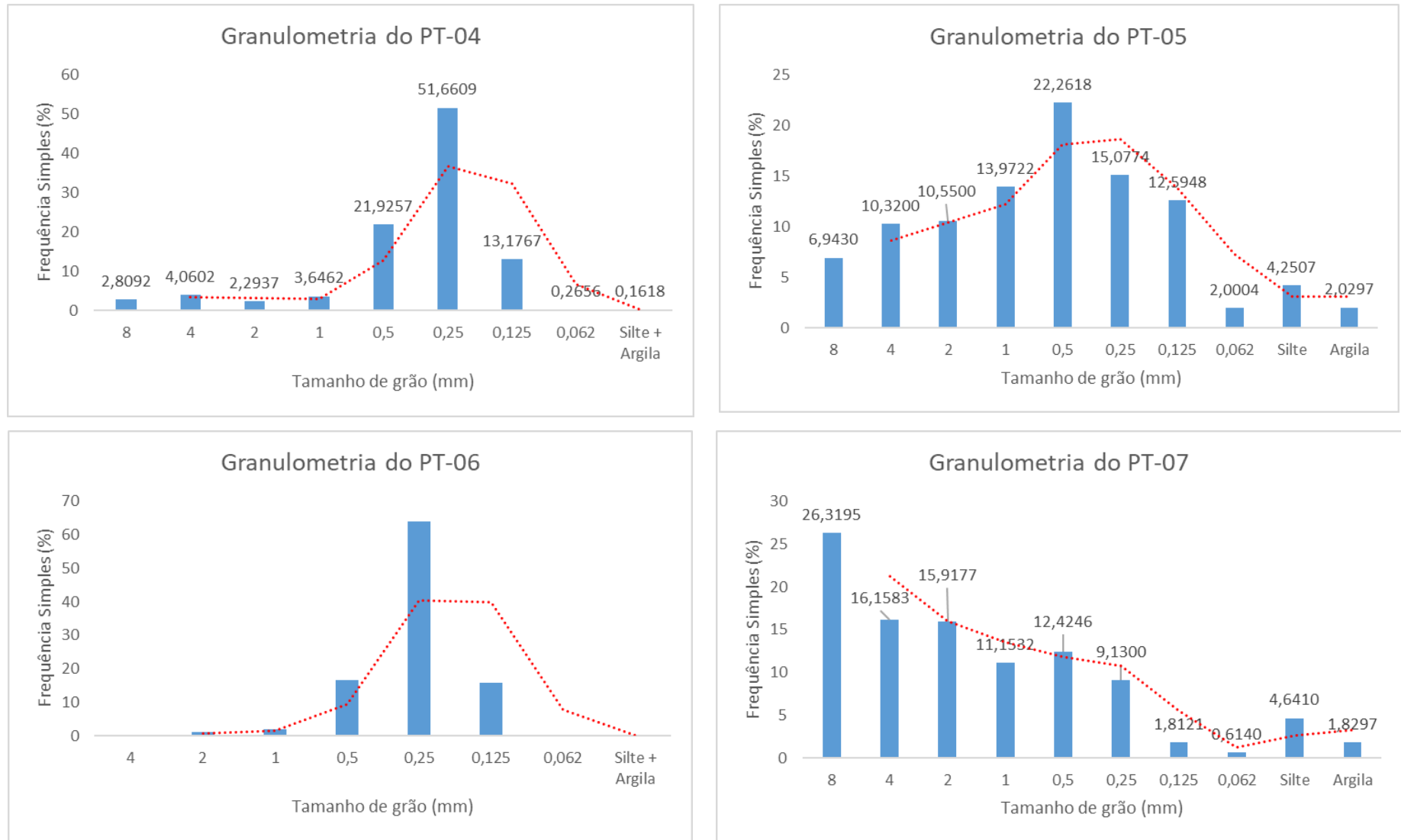


Figura 42: Dados de granulometria para os pontos 04, 05, 06 e 07.

7 – RESULTADOS

Tabela 13: Tabela de conteúdo de sedimentos finos em gramas e porcentagem para cada ponto de amostragem do Arroio Poacá.

Pontos de Amostragem	Conteúdo de Finos (g)	Conteúdo de Finos (%)
PT – 04	0,1941	0,1618
PT – 05	10,18	6,27
PT – 06	0,1469	0,1356
PT – 07	9,46	6,47

O Arroio Poacá apresenta pouca ou nenhuma ocorrência de partículas maiores do que areia, à exceção do PT – 07. Os grãos das classes das areias (0,125 mm a 2 mm) parecem ser os mais abundantes nos pontos em questão. O conteúdo de finos é variável, porém são menos abundantes no PT – 04 e no PT – 06. Os PT – 05 e PT – 07 apresentam o conteúdo de finos mais elevado, tendo concentrações semelhantes entre si.

7.2.2 Mineralogia – DRX

7.2.2.1 Rocha Total (RT)

Os resultados obtidos por DRX das amostras analisadas pela metodologia de rocha total no Arroio Poacá são apresentadas na Figura 43, a seguir.

7 – RESULTADOS
Arroio Poacá

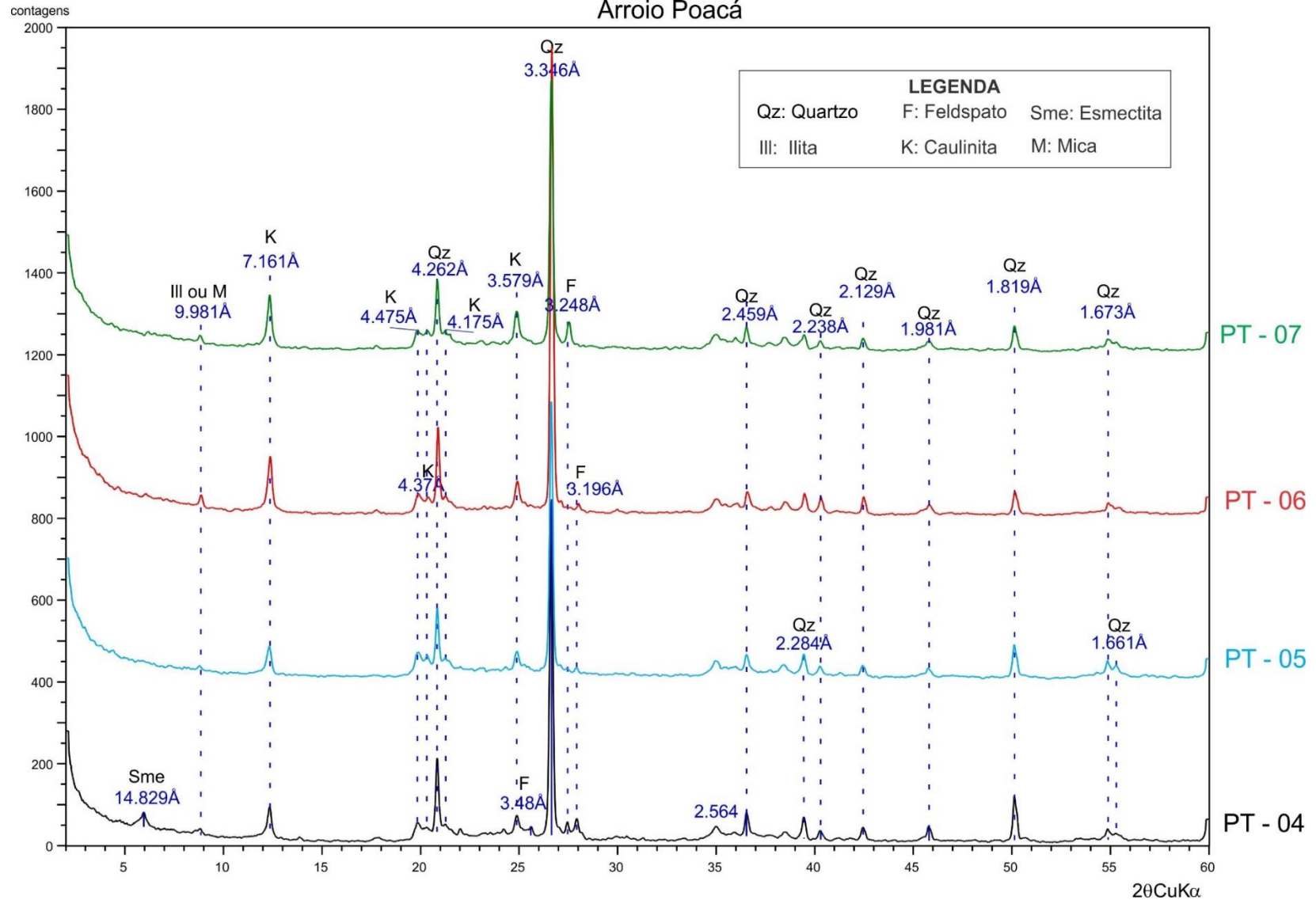


Figura 43: Difratogramas interpretados das amostras analisadas pela metodologia de rocha total do Arroio Poacá.

A análise por RT (Figura 43) indicou que o PT – 04 é o único ponto do Arroio Poacá que apresenta minerais expansivos, como a esmectita, representados pelo pico em 14,82 Å. Em alguns pontos, sobretudo no 06 e no 07, aparece um pequeno pico 9,98 Å que pode ser interpretado como uma mica, ou uma illita. O quartzo é um mineral abundante em todos os pontos, tendo seu pico principal em 3,34 Å, secundário em 4,26 Å e diversos outros menos proeminentes com distâncias menores. O feldspato aparece bem representado no PT – 04, com os picos em 3,48 Å, em 3,196 Å e em 3,248Å. Embora o pico dele exista nos outros pontos, é menos expressivo, indicando uma possível redução na sua concentração. A caulinita, importante argilomineral com estrutura 1:1, aparece em todos os pontos com picos bem formados. O pico principal está em 7,16 Å, enquanto o secundário está em 3,579 Å. Alguns picos menores aparecem com menos expressividade.

7.2.2.2 *Amostra Orientada*

As análises das amostras orientadas permitiram um refinamento nos dados referentes a ocorrência de argilominerais nos pontos amostrados (Figura 44 a Figura 47).

O PT – 04 (Figura 44) contém os minerais quartzo, caulinita, esmectita, vermiculita e mica. A esmectita e a vermiculita aparecem com picos discretos por volta dos 14 e 15 Å, enquanto que a mica, apesar do pico discreto na amostra orientada natural para o ponto em questão, apresenta picos bem formados na glicolada e calcinada em 9,7 Å. A caulinita tem dois picos bastante definidos na natural e glicolada em 7,15 Å e 3,57 Å, desaparecendo na calcinada, comportamento típico do mineral que, quando exposto a temperaturas elevadas, tem sua estrutura destruída. O quartzo aparece com um pico discreto na amostra natural em 3,34 Å. Este pico fica mais evidente nas amostras glicolada e calcinada.

7 – RESULTADOS

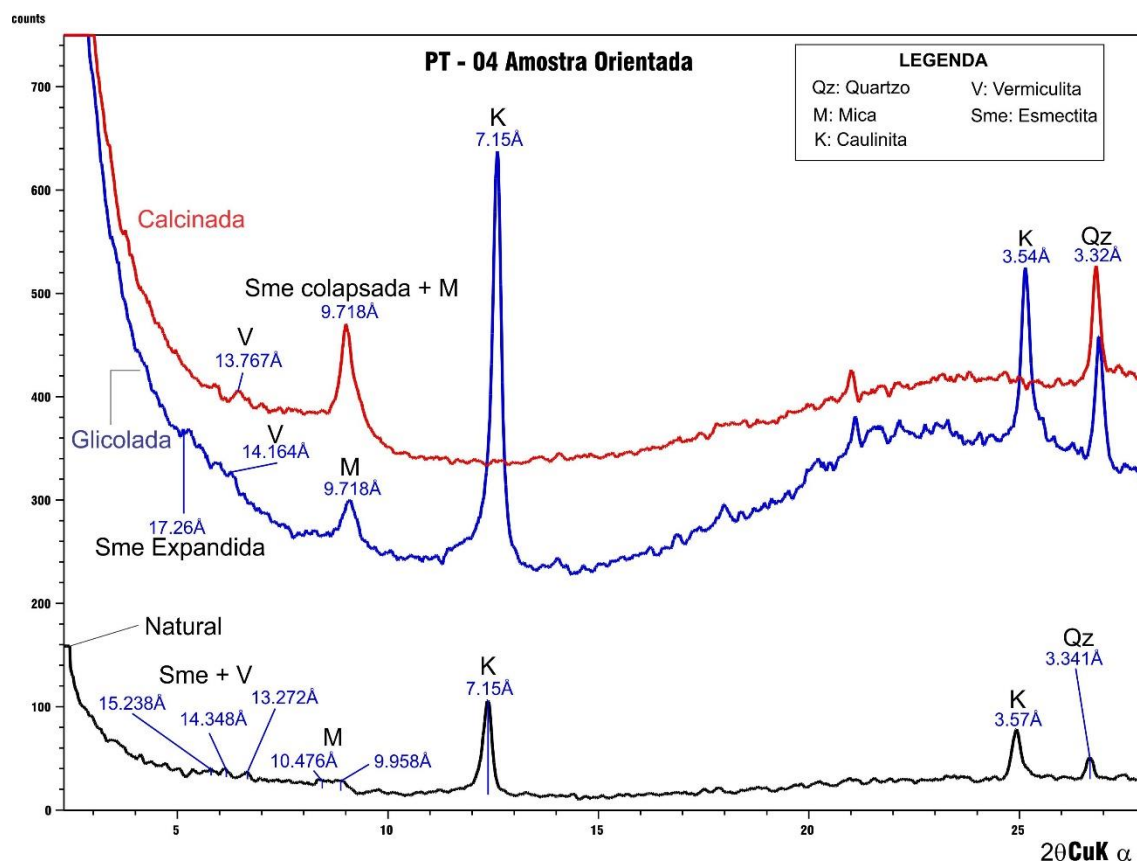


Figura 44: Difratoograma interpretado do PT – 04 analisado pela técnica de amostra orientada.

Na Figura 45, o difratoograma para o PT – 05 apresenta apenas o mineral caulinita, representado pelos seus picos 7,17 Å e 3,57 Å. O mesmo acontece para as amostras representantes dos pontos 06 e 07 (Figura 46 e Figura 47, respectivamente).

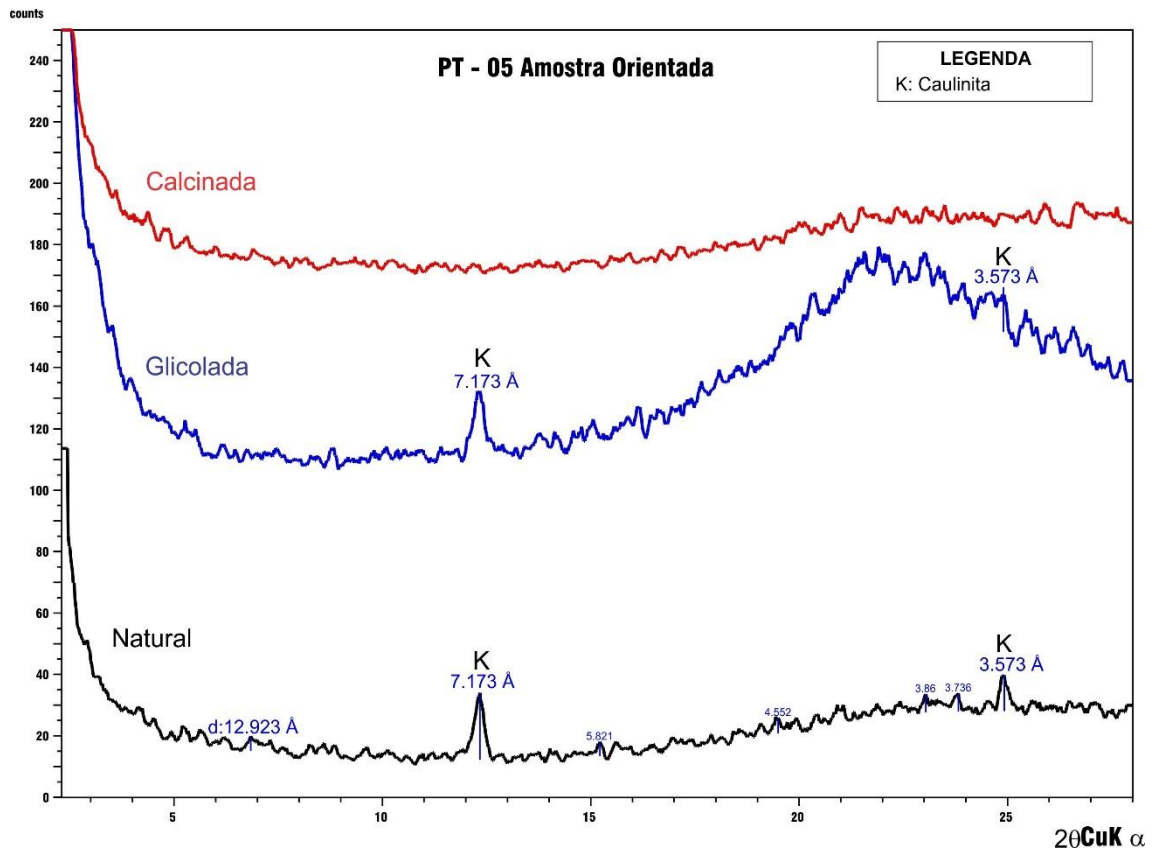


Figura 45: Difratoograma interpretado do PT – 05 analisado pela técnica de amostra orientada.

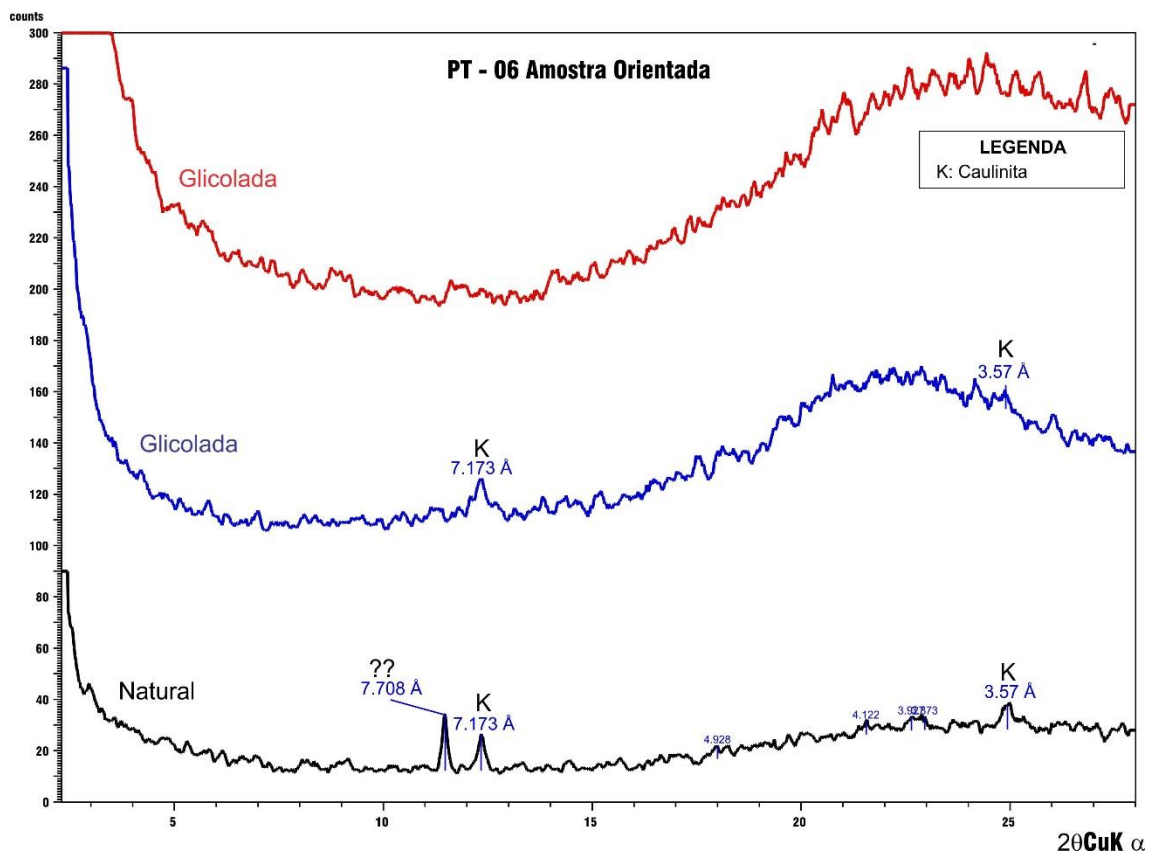


Figura 46: Difratoograma interpretado do PT – 06 analisado pela técnica de amostra orientada.

7 – RESULTADOS

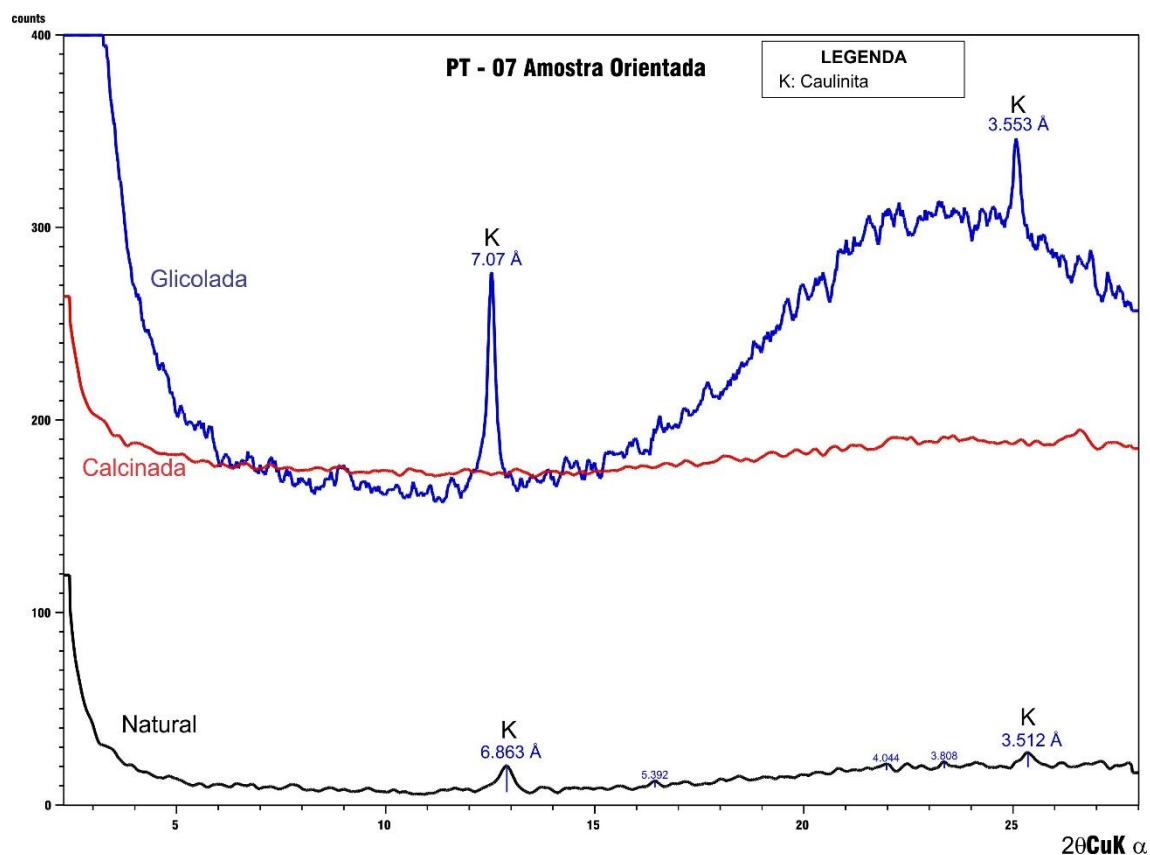


Figura 47: Difratoograma interpretado do PT – 07 analisado pela técnica de amostra orientada.

7.2.3 Geoquímica – FRX

7.2.3.1 Sedimentos de Fundo

7.2.3.1.1 Elementos Maiores

As tabelas a seguir (Tabela 14 e Tabela 15) contêm os dados geoquímicos dos elementos maiores dos sedimentos de fundo dos pontos amostrados no Arroio Poacá, bem como seus resultados para os três índices geoquímicos calculados.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 14, é possível identificar que a tendência de empobrecimento em sílica dos pontos a montante para jusante também acontece nos pontos do Arroio Poacá. O alumínio não apresenta nenhuma tendência verificável pelas técnicas analíticas empregadas. O titânio tem concentração constante em todos os pontos. O ferro, ao contrário da sílica, tem a tendência de se enriquecer de montante para jusante, sobretudo nos pontos que recebem mais influência dos efluentes da mineração. O manganês tem um decréscimo de montante a jusante, enquanto que o magnésio tem concentrações relativamente constantes. O cálcio foi detectado no PT – 04, porém nos pontos 05 e

7 – RESULTADOS

06 não foi detectado e no PT – 07 foi detectado, mas em quantidade consideravelmente mais baixa. Assim como nos pontos do Arroio Candiota, o sódio também não foi detectado. O potássio apresenta concentrações relativamente constantes, tendo um pequeno empobrecimento de montante a jusante. O fósforo tem concentrações constantes.

Os resultados dos índices geoquímicos calculados (Tabela 15) reforçam os comportamentos indicados pelas concentrações dos elementos nos sedimentos. A sílica aparece com empobrecimento de montante a jusante e também com empobrecimento relativo ao *background*. Enquanto isso, o alumínio apresenta enriquecimento relativo de montante a jusante. O ferro apresenta fatores indicando enriquecimento de mais de duas vezes nos pontos mais afetados pelos efluentes da mineração (PT – 06 e PT – 07), enquanto os pontos 04 e 05 também apresentam enriquecimento, embora menos expressivo. No PT – 04 o magnésio e o cálcio apresentam enriquecimento leve, enquanto nos outros pontos apresentam deficiência. O manganês e o potássio estão empobrecidos em todos os pontos.

O Quadro 9 contém as classificações dos índices geoquímicos calculados para os elementos maiores nos sedimentos de fundo do Arroio Poacá. A sílica é classificada como deficiente em enriquecimento em todos os pontos, enquanto o alumínio é considerado levemente enriquecido em todos. O ferro também apresenta enriquecimento leve e contaminação moderada, porém para o Igeo é classificado como não poluído a poluído. Tanto o manganês como o potássio apresentam deficiência em enriquecimento em todos os pontos. O magnésio é levemente enriquecido nos pontos 04 e 07 e deficiente nos pontos 05 e 06. Já o cálcio é classificado como levemente enriquecido no PT – 04, não foi detectado nos pontos 05 e 06 e está empobrecido no PT – 07.

7 – RESULTADOS

Tabela 14: Concentração dos elementos maiores nos sedimentos de fundo do Arroio Poacá. Nd = não detectado. LOI = Perda ao Fogo (Loss of Ignition).

Elementos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
PT – 04	63,61	14,37	0,87	8,02	0,09	0,65	0,46	Nd	1,88	0,13	9,9	99,98
PT – 05	57	15,63	0,87	8,97	0,02	0,37	Nd	Nd	1,24	0,11	15,81	100,02
PT – 06	56,25	14,64	0,8	12,27	0,02	0,36	Nd	Nd	1,32	0,1	14,25	100,01
PT – 07	52,77	15,38	0,77	10,54	0,03	0,56	0,09	Nd	1,31	0,13	18,41	99,99

Tabela 15: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos 04, 05, 06 e 07.

Elementos	PT – 04			PT – 05			PT – 06			PT – 07		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
SiO ₂	0,78	0,93	-0,69	0,70	0,83	-0,85	0,75	0,82	-0,865	0,73	0,77	-0,96
Al ₂ O ₃	1,015	1,21	-0,31	1,10	1,31	-0,19	1,125	1,23	-0,28	1,23	1,29	-0,21
Fe ₂ O ₃	1,28	1,52	0,02	1,43	1,70	0,18	2,12	2,32	0,63	1,90	2	0,41
MnO	0,06	0,07	-4,40	0,01	0,015	-6,57	0,01	0,015	-6,57	0,02	0,02	-5,99
MgO	1,3	1,55	0,04	0,74	0,88	-0,77	0,78	0,85	-0,81	1,26	1,33	-0,17
CaO	1,07	1,27	-0,23	-	-	-	-	-	-	0,24	0,25	-2,58
K ₂ O	0,7	0,88	-0,765	0,48	0,58	-1,365	0,565	0,62	-1,275	0,58	0,615	-1,29

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 04			PT – 05		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
SiO ₂	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Al ₂ O ₃	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Fe ₂ O ₃	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
MnO	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
MgO	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
CaO	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Não Detectado	Não Detectado	Não Detectado
K ₂ O	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
	PT – 06			PT – 07		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
SiO ₂	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Al ₂ O ₃	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Fe ₂ O ₃	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
MnO	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
MgO	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
CaO	Não Detectado	Não Detectado	Não Detectado	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
K ₂ O	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído

Quadro 9: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos maiores dos pontos representantes do Arroio Poacá.

7 – RESULTADOS

7.2.3.1.2 Elementos Menores e Traços

A Tabela 16, a seguir, contém os dados das concentrações dos elementos menores e traços nos sedimentos de fundo do Arroio Poacá.

Tabela 16: Concentração dos elementos menores e traços nos sedimentos de fundo do Arroio Poacá.

Elementos	PT – 04	PT – 05	PT – 06	PT – 07
Cr	64,9	75	88,5	88,4
Ba	546,1	279,3	269,4	274,3
Rb	89,4	79,4	69,4	74,5
Ga	17,1	17,8	15,3	16,3
U	4,9	5,3	4,2	5,6
Pb	0	0	0	0
As	78,6	64,5	62,5	56,1
Y	53,9	57,2	57,4	59,5
Co	14,6	4,2	5,3	13,4
Ni	16,3	9,5	4,6	23,3
Cu	33,7	11,8	5,7	10
S	1548,3	3325,2	4769,4	4111,4
Cd	0	0	0	0
V	124,8	120,6	131,8	126,5
Mo	1	0,8	0,1	0,3
Zn	76,4	52,5	47,6	90,7

O Cr, assim como o S e o Y, apresenta a tendência de ter maior concentração conforme se avança para os pontos a jusante. O Ba e o As tem tendência oposta, com concentrações maiores nos pontos a montante. O Rb e o Cu também tendem a estar menos concentrados nos pontos mais próximos à foz. Os demais elementos não aparentam seguir uma tendência clara nas suas concentrações. O vanádio apresenta certa constância nas suas concentrações, assim como o urânio e o gálio.

A Tabela 17, a seguir, contém os dados dos índices geoquímicos calculados para cada elemento e para cada ponto e a Figura 48 ilustra os resultados por meio de gráficos.

7 – RESULTADOS

Tabela 17: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de fundo dos pontos 04, 05, 06 e 07.

Elementos	PT – 04			PT – 05			PT – 06			PT – 07		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Cr	1,18	1,41	-0,09	1,37	1,63	0,12	1,755	1,92	0,36	1,82	1,92	0,36
Ba	0,34	0,40	-1,89	0,17	0,21	-2,86	0,18	0,20	-2,91	0,19	0,20	-2,89
Rb	0,77	0,92	-0,7	0,69	0,82	-0,87	0,65	0,72	-1,07	0,73	0,77	-0,96
Ga	1,12	1,335	-0,17	1,17	1,39	-0,11	1,09	1,195	-0,33	1,21	1,27	-0,24
U	1,03	1,225	-0,29	1,11	1,325	-0,18	0,96	1,05	-0,51	1,33	1,4	-0,1
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
As	1,43	1,70	0,18	1,17	1,40	-0,10	1,23	1,35	-0,15	1,15	1,21	-0,30
Y	0,93	1,11	-0,43	0,99	1,18	-0,35	1,08	1,18	-0,34	1,16	1,22	-0,29
Co	0,35	0,42	-1,83	0,10	0,12	-3,63	0,14	0,15	-3,295	0,37	0,39	-1,96
Ni	0,38	0,45	-1,74	0,22	0,26	-2,51	0,115	0,13	-3,56	0,61	0,64	-1,22
Cu	0,27	0,32	-2,21	0,095	0,11	-3,72	0,05	0,05	-4,77	0,09	0,1	-3,96
S	0,955	1,14	-0,4	2,05	2,44	0,70	3,2	3,51	1,22	2,865	3,02	1,01
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	1,18	1,41	-0,09	1,14	1,36	-0,14	1,36	1,49	-0,01	1,36	1,43	-0,07
Zn	0,90	1,07	-0,5	0,62	0,73	-1,03	0,61	0,665	-1,17	1,20	1,27	-0,24

7 – RESULTADOS

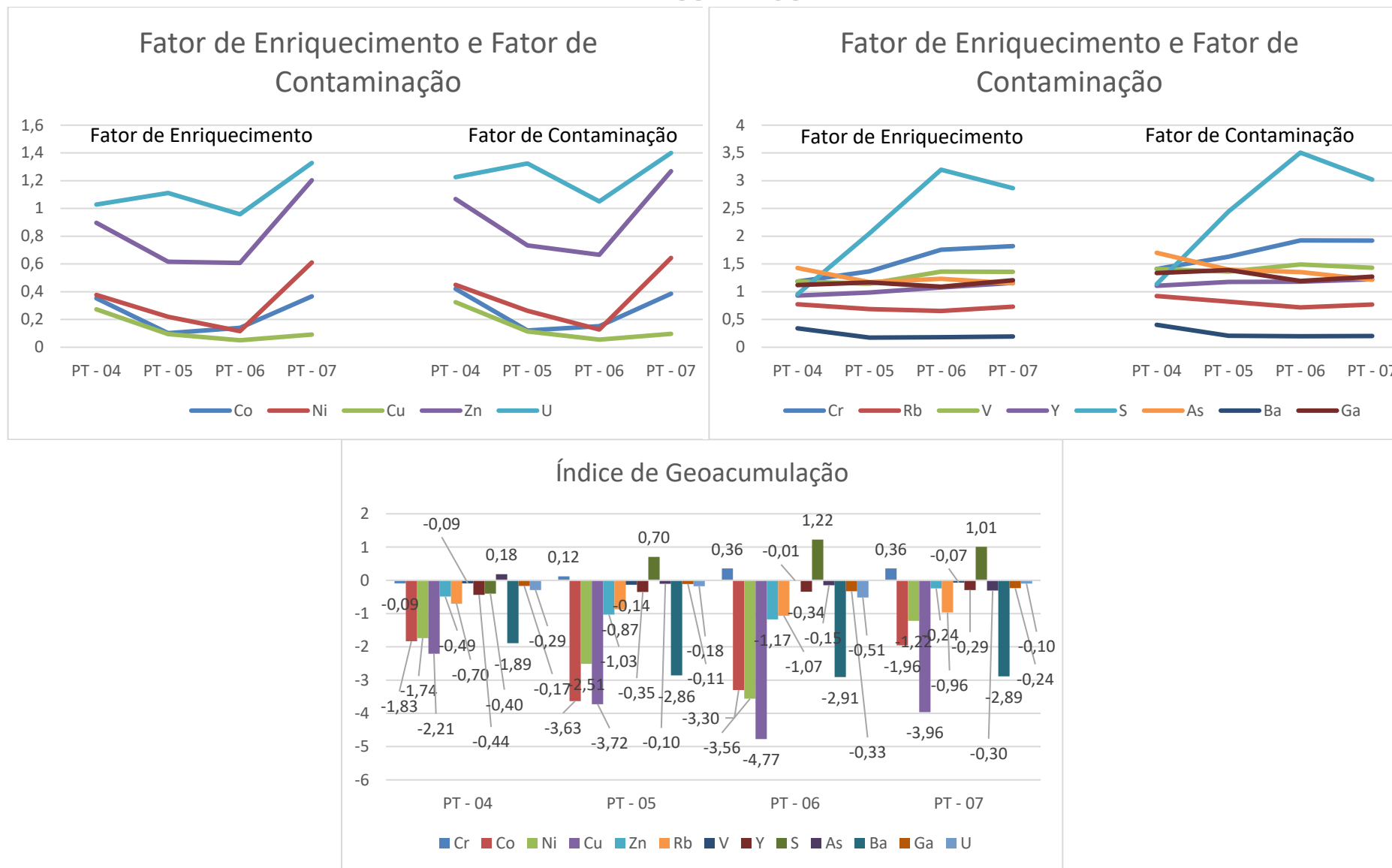


Figura 48: Gráficos dos resultados dos índices geoquímicos: Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação e Índice de Geoacumulação para os elementos menores e traços do sedimento de fundo do Arroio Poacá.

7 – RESULTADOS

A partir da análise dos dados e dos gráficos anteriormente apresentados, é possível observar certas tendências. Elementos como Cu, Ni, Zn, U e Co, apesar de terem índices geoquímicos demonstrando empobrecimento, seguem padrões similares nos pontos. Esses elementos têm um declínio no enriquecimento do PT – 04 ao PT – 06. No PT – 07 novamente voltam a enriquecer. Outros elementos como o Cr, o V e o Y, levemente enriquecidos, seguem a tendência de manter relativamente estáveis seu enriquecimento nos pontos 04, 05 e 06, apresentando maior enriquecimento no PT – 07. O bário, o rubídio, o gálio e o arsênio apresentam índices constantes ao longo dos pontos, sem que sejam enriquecidos no ponto sete. O enxofre apresenta o comportamento como o do Cr, no entanto, seu enriquecimento é muito mais acentuado, alcançando a marca de três vezes mais enriquecido do que o *background*.

Os quadros a seguir (Quadro 10 e Quadro 11) apresentam as classificações de cada elemento em cada ponto e para cada índice geoquímico. As classificações dos elementos Ni, Co, Cu, Ba, Rb apontam deficiência de enriquecimento, baixa contaminação e não poluição em todos os pontos. O Cr, o U, o Ga, o As e o V estão levemente enriquecidos em todos os pontos analisados. O zinco apresenta enriquecimento apenas no PT – 07. O enxofre aparece com deficiência de enriquecimento no PT – 04 e, logo, tem sua concentração aumentada nos pontos seguintes sendo mais concentrado no PT – 06, onde atinge o fator de enriquecimento maior do que três. O cádmio e o chumbo não foram detectados nos sedimentos de fundo de nenhum dos pontos do Arroio Poacá.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 04			PT – 05		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Cr	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Ba	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Rb	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Ga	Levemente Enriquecido	Contaminação Moderada	Não Poluído	Levemente Enriquecido	Contaminação Moderada	Não Poluído
U	Levemente Enriquecido	Contaminação Moderada	Não Poluído	Levemente Enriquecido	Contaminação Moderada	Não Poluído
Pb	-	-	-	-	-	-
As	Levemente Enriquecido	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Levemente Enriquecido	Contaminação Moderada	Poluído
Y	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
Co	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Ni	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Cu	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
S	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Cd	-	-	-	-	-	-
V	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Zn	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído

Quadro 10: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos 04 e 05 do Arroio Poacá.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 06			PT – 07		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Cr	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Ba	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Rb	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Ga	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
U	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Pb	-	-	-	-	-	-
As	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Y	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Co	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Ni	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Cu	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
S	Enriquecimento Moderado	Contaminação Considerável	Moderadamente Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Considerável	Moderadamente Poluído
Cd	-	-	-	-	-	-
V	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído
Zn	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído

Quadro 11: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de fundo dos pontos 06 e 07 do Arroio Poacá.

7 – RESULTADOS

7.2.3.2 Sedimentos de Suspensão

A Tabela 18 contém os dados geoquímicos das concentrações dos elementos menores e traços nos sedimentos de suspensão do Arroio Poacá.

Tabela 18: Concentração dos elementos menores e traços em ppm nos pontos amostrados dos sedimentos de suspensão do Arroio Poacá.

Elementos	PT – 04	PT – 05	PT – 06	PT – 07
Cr	6,6	29,8	0	44,3
Ba	2316,5	736,7	2152,3	766,2
Rb	0	0	130,3	0
Ga	0	0	1,1	3,5
U	0	0	5,3	0
Pb	3,7	0	25,4	14,2
As	1,3	1,9	3,1	5,7
Y	19,1	15,4	5,4	31,1
Co	0,2	0,3	0,8	3,4
Ni	9,4	10,6	10,4	8,8
Cu	30,9	43,9	26,7	197,1
S	486,7	1168,8	5441,9	15784
Cd	1,7	1,5	1,5	1,5
V	6,3	7,6	3,2	28,3
Mo	0	0	0	0
Zn	917,8	322,8	863,7	378,2
Fe ₂ O ₃	10380	13040	38330	168470
MnO	2070	240	70	400
TiO ₂	690	1000	100	4840

Os resultados apresentados indicam que o As se enriquece de montante a jusante, bem como o enxofre e o ferro. O chumbo tem suas concentrações aumentadas no PT – 06 e PT – 07 em relação às dos pontos anteriores. O Cd e o Ni tendem a manter certa constância nas suas concentrações. O restante dos elementos analisados não apresenta uma tendência clara nas suas concentrações ao longo dos pontos. Os dados a seguir (Tabela 19 e Quadro 12 a Quadro 15) contém os resultados calculados dos índices geoquímicos, bem como as suas respectivas classificações.

7 – RESULTADOS

Tabela 19: Resultados dos índices geoquímicos para os elementos traços e menores dos sedimentos de suspensão dos pontos 04, 05, 06 e 07.

Elementos	PT – 04			PT – 05			PT – 06			PT – 07		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
MnO	1,875	7,39	2,30	0,15	0,86	-0,81	0,44	0,25	-2,58	0,05	1,43	-0,07
Fe ₂ O ₃	0,52	2,04	0,44	0,45	2,56	0,77	13,18	7,53	2,33	1,20	33,10	4,46
Cr	0,34	1,35	-0,155	1,06	6,08	2,02	0	0	-	0,33	9,04	2,59
Ba	0,24	0,955	-0,65	0,05	0,30	-2,30	1,55	0,89	-0,76	0,01	0,32	-2,25
Rb	0	0	-	0	0	-	32,575	18,61	3,63	0	0	-
Pb	0,07	0,26	-2,515	0	0	-	3,15	1,80	0,26	0,04	1,01	-0,57
As	0,07	0,28	-2,44	0,07	0,40	-1,89	1,15	0,66	-1,185	0,04	1,21	-0,31
Y	0,17	0,66	-1,18	0,09	0,53	-1,49	0,33	0,19	-3	0,04	1,08	-0,48
Co	0,51	2	0,41	0,525	3	1	14	8	2,415	1,23	34	4,50
Ni	0,23	0,90	-0,73	0,18	1,02	-0,56	1,75	1	-0,58	0,03	0,85	0,825
Cu	0,29	1,14	-0,4	0,28	1,61	0,105	1,72	0,98	-0,61	0,26	7,25	2,27
S	0,21	0,83	-0,85	0,35	2	0,42	16,31	9,32	2,635	0,98	27,03	4,17
Cd	0,29	1,13	-0,40	0,175	1	-0,58	1,75	1	-0,58	0,04	1	-0,58
V	0,69	2,74	0,87	0,58	3,30	1,14	2,43	1,39	-0,11	0,44	12,30	3,04
Zn	0,23	0,91	-0,71	0,06	0,32	-2,22	1,505	0,86	-0,80	0,01	0,38	-1,99

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 04			PT – 05		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
MnO	Enriquecimento Leve	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Fe ₂ O ₃	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Cr	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Enriquecimento Leve	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído
Ba	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Rb	Não detectado	Não detectado	Não detectado	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Pb	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Não detectado	Não detectado	Não detectado
As	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído

Quadro 12: Classificação dos Índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 04 e 05. Parte 1.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 04			PT – 05		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Y	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Co	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Ni	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
Cu	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
S	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído
Cd	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
V	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Considerável	Moderadamente Poluído
Zn	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído

Quadro 13: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 04 e 05. Parte 2.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 06			PT – 07		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
MnO	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
Fe ₂ O ₃	Enriquecimento Severo	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído	Enriquecimento Leve	Alta Contaminação	Fortemente a Extremamente Poluído
Cr	Não detectado	Não detectado	Não detectado	Deficiência de Enriquecimento	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído
Ba	Enriquecimento Leve	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Rb	Enriquecimento Muito Severo	Alta Contaminação	Fortemente Poluído	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Pb	Enriquecimento Moderado	Contaminação Moderada	Não Poluído a Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
As	Enriquecimento Leve	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído

Quadro 14: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 06 e 07. Parte 1.

7 – RESULTADOS

Elementos	PT – 06			PT – 07		
	FE	FC	Igeo	FE	FC	Igeo
Y	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
Co	Enriquecimento Severo	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído	Enriquecimento Leve	Alta Contaminação	Fortemente a Extremamente Poluído
Ni	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído
Cu	Enriquecimento Leve	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído
S	Enriquecimento Severo	Alta Contaminação	Moderadamente a Fortemente Poluído	Enriquecimento Leve	Alta Contaminação	Fortemente a Extremamente Poluído
Cd	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Contaminação Moderada	Não Poluído
V	Enriquecimento Leve	Contaminação Moderada	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Alta Contaminação	Fortemente Poluído
Zn	Enriquecimento Leve	Baixa Contaminação	Não Poluído	Deficiência de Enriquecimento	Baixa Contaminação	Não Poluído

Quadro 15: Classificação dos índices geoquímicos para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão dos pontos 06 e 07. Parte 2.

8 – DISCUSSÕES

A partir dos resultados indicados nas tabelas, é possível verificar que o PT – 06 apresenta enriquecimento de Rb que não se verifica nos outros pontos. Elementos como manganês, ferro, crômio, cobalto e enxofre estão muito enriquecidos em alguns pontos, chegando a atingir valores de mais de dez vezes de enriquecimento em relação ao *background*. Os demais elementos ou estão deficientes, ou apresentam enriquecimento leve a moderado.

Os gráficos a seguir (Figura 49 e Figura 50) explicitam o comportamento do enriquecimento dos elementos.

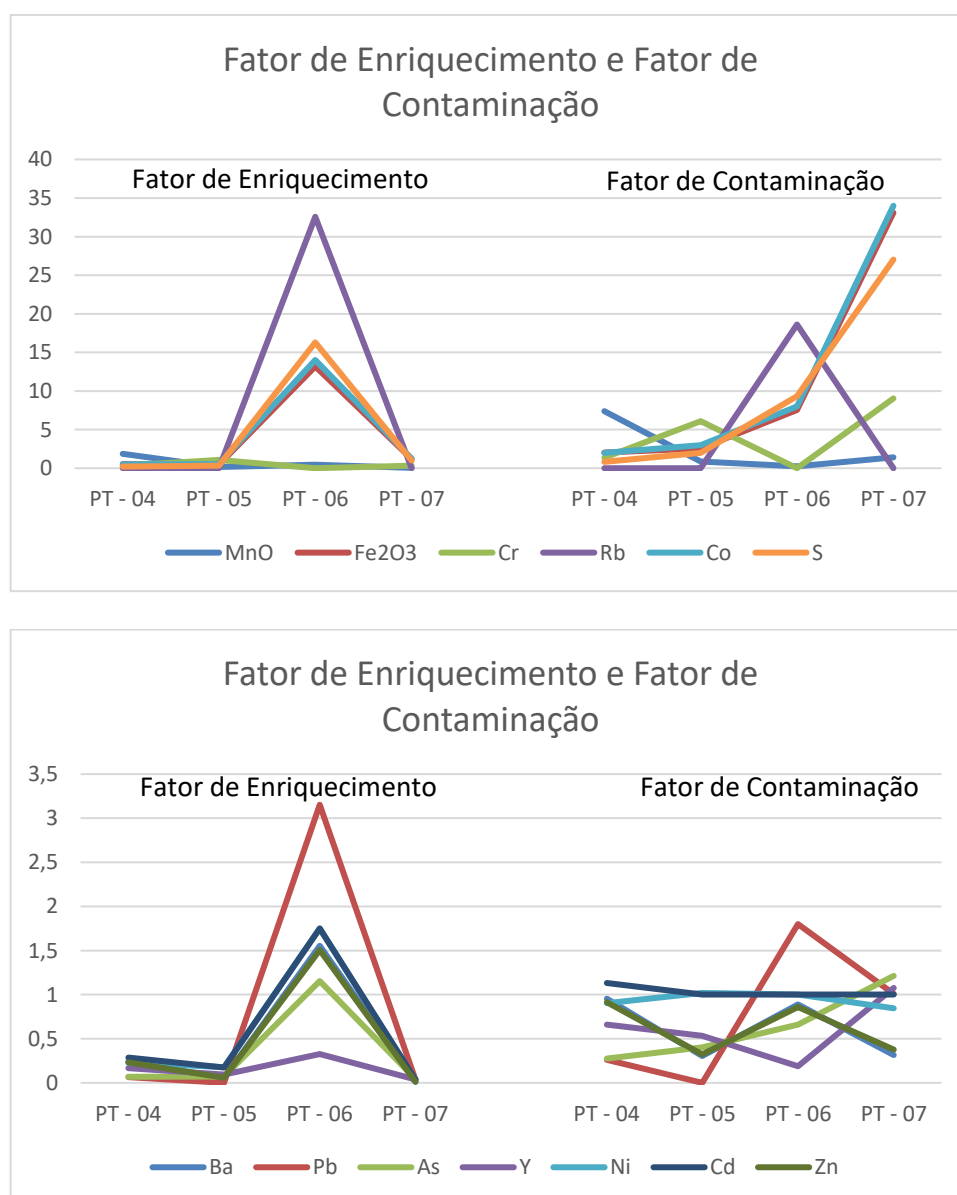


Figura 49: Gráficos dos resultados do fator de enriquecimento e do fator de contaminação para os elementos menores e traços dos sedimentos de suspensão do Arroio Poacá. Parte 1.

8 – DISCUSSÕES

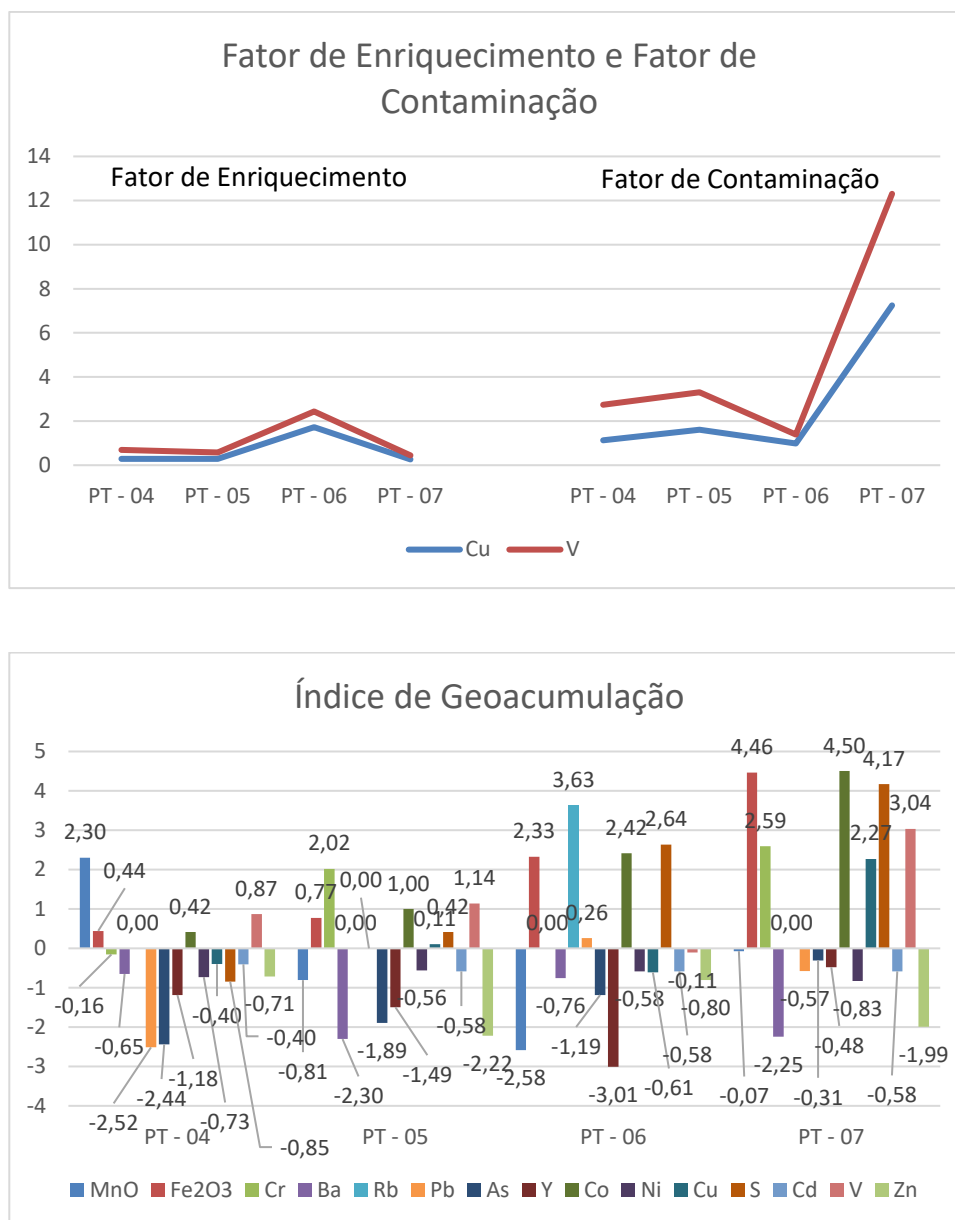


Figura 50: Gráficos dos resultados para o fator de enriquecimento, fator de contaminação e índice de geoacumulação para os sedimentos de suspensão do Arroio Poacá. Parte 2

De acordo com o demonstrado pelos gráficos anteriores, percebe-se que diversos elementos apresentam enriquecimento no PT – 06 para depois voltar a níveis mais baixos de enriquecimento no PT – 07. Tal comportamento pode ser observado pelos picos que esses elementos têm nos seus resultados de índices geoquímicos. É importante ressaltar que o fator de enriquecimento e o fator de contaminação têm resultados que mostram uma distinção na tendência entre os dois. Apesar de que em alguns casos a concentração de determinado elemento é maior no PT – 07 do que no PT – 06, seu resultado para o FE mostra uma queda do PT – 06 para o PT – 07. Isso será comentado no capítulo das discussões, a seguir.

8 DISCUSSÕES

As análises granulométricas apontaram algumas semelhanças entre os pontos contidos nos mesmos arroios, determinando, de certa forma, algumas características mineralógicas que diferem um arroio do outro. Além disso, demonstraram uma progressão esperada de aumento de sedimentos finos e redução da quantidade de sedimentos grossos à medida que se distanciam da cabeceira da drenagem (Figura 51).

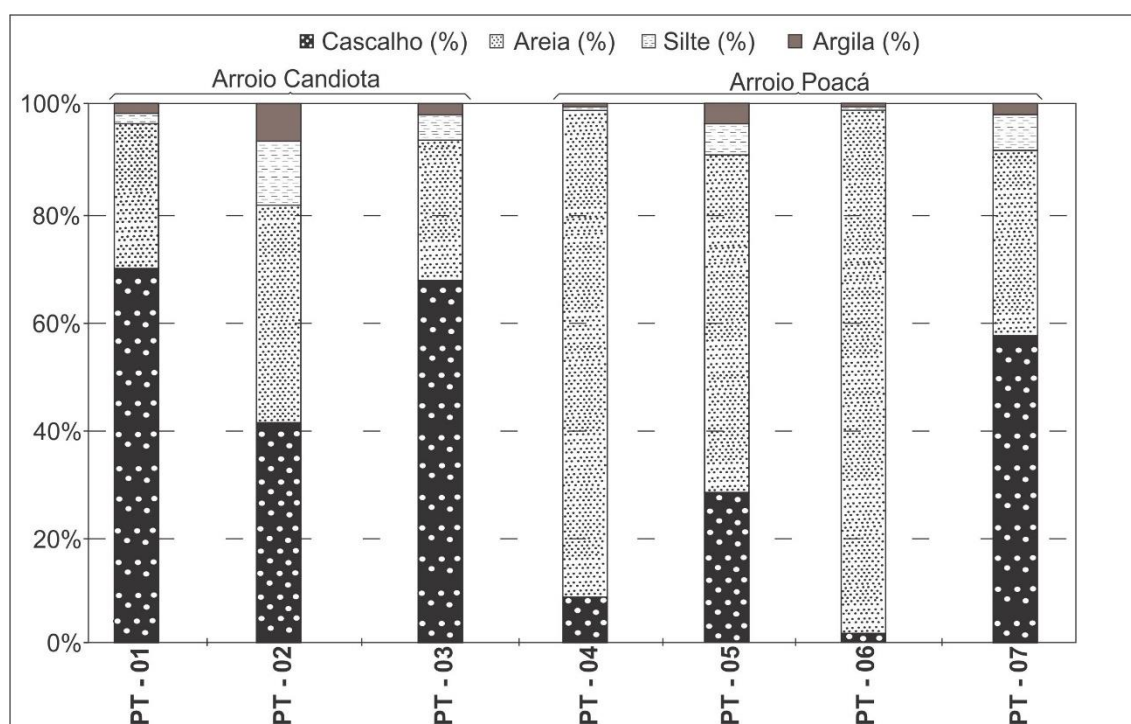


Figura 51: Comparação das distribuições granulométricas, em porcentagem (%), de acordo com o ponto e arroio nos quais foram coletadas as amostras.

O Arroio Candiota apresenta maior quantidade de partículas tamanho cascalho, resultado esperado, pois trata-se de um arroio de dimensões consideravelmente maiores em relação ao Arroio Poacá, tendo maior capacidade hidrodinâmica. O ponto dois, no Arroio Candiota, contém quantidade de partículas finas que foge à tendência observada nos outros pontos. Esse aumento de sedimentos finos pode ser explicado pela existência de uma barragem a jusante do ponto de coleta. Essa barragem represa

as águas, reduz a capacidade hidrodinâmica e facilita a sedimentação de partículas finas, compostas sobretudo por argilominerais.

Já no Arroio Poacá, o PT – 04 tem baixa quantidade de partículas finas pois está localizado mais próximo da cabeceira do arroio. O PT – 05 contém partículas finas em maior quantidade quando comparado com o PT – 04, o que é esperado, visto que está a jusante do anterior. O PT – 06 destoa dos pontos no seu entorno por ter sido coletado no Arroio Carvoeira, que é um afluente do Arroio Poacá. Esse arroio apresenta-se altamente alterado e suas fontes de materiais são o rejeito da mineração de carvão e o produto da lixiviação de um grande aterro sanitário. A sua menor quantidade de sedimentos finos pode ser explicada pela proximidade com a área fonte. Já o PT – 07 tem um considerável aumento na quantidade de partículas grossas. Esse resultado não segue a tendência de evolução sedimentológica esperada para esse arroio. Tal aumento pode estar associado à construção de pontes e taludes às margens do arroio.

Observa-se que para aquelas amostras obtidas nos pontos mais a montante das drenagens, os resultados apontam para uma menor quantidade de argilas em relação às coletadas mais a jusante. No entanto, algumas variações decorrentes de atividades antrópicas podem alterar essa tendência e até mesmo acrescentar material que não se esperava encontrar. O PT – 02, por exemplo, apresenta um aumento considerável na quantidade de partículas finas, evidenciado pelos resultados anteriormente apresentados.

O Quadro 16, a seguir, ilustra a mineralogia encontrada em cada ponto pelo método de RT da DRX.

		Rocha Total < 60 µm						
		Quartzo	Mica	Feldspato	Caulinita	Esmectita	Talco	Calcita
Arroio Candiota	PT - 01	x	x	x	x			
	PT - 02	x	x	x	x	x		
	PT - 03	x	x	x	x	x	x	x
Arroio Poacá	PT - 04	x	x	x	x	x		
	PT - 05	x	x	x	x			
	PT - 06	x	x	x	x			
	PT - 07	x	x	x	x			

Quadro 16: Tabela representando a ocorrência mineral em cada amostra detectada pela DRX utilizando a metodologia de Rocha Total na fração menor do que 60 µm.

8 – DISCUSSÕES

Tais mudanças podem ser observadas mineralogicamente na ocorrência de argilominerais, pouco observados no PT – 01 e amplamente observados no PT – 02 (Quadro 16 e Quadro 17). A construção de uma barragem pela CGTEE pode ser a causa dessa redução da energia hidrodinâmica do arroio e a consequente facilitação da deposição de minerais finos e placoides, como é o caso dos argilominerais. Outro fator que pode ter tido interferência da atividade humana é a estranha ocorrência dos picos dos minerais calcita e talco na amostra PT – 03. O ponto é bastante alterado e já foi alvo da construção de uma ponte. Nas proximidades do ponto de coleta foi localizada uma mina de mármore. A atividade dessa mineração deve ser a fonte principal de calcita e talco para esse ponto. Como foi observado nos resultados de geoquímica, a ocorrência de calcita e talco nesses pontos também pode ser constatada pela ocorrência do cálcio e do magnésio em proporções maiores do que nos outros pontos.

		Amostra Orientada < 4 μm					
		Quartzo	Mica	Caulinita	Esmectita	Talco	Vermiculita
Arroio Candiota	PT - 01	x		x			
	PT - 02	x	x	x	x		
	PT - 03	x	x	x	x	x	x
Arroio Poacá	PT - 04	x	x	x	x		x
	PT - 05			x			
	PT - 06			x			
	PT - 07			x			

Quadro 17: Tabela de ocorrência mineral na fração menor do que 4 μm nas amostras analisadas pelo método de Amostra Orientada.

Os pontos representativos do Arroio Poacá apresentam mineralogia principal igual aos pontos representativos do Arroio Candiota. O PT – 04, dos pontos coletados, é aquele que está localizado mais próximo à cabeceira do arroio. Ele não recebe nenhum efluente direto da mineração de carvão, embora esteja muito próximo e possa receber aporte de água das áreas de rejeito em períodos de chuva intensa. Sua mineralogia é muito similar àquelas observadas nos pontos 2 e 3, com exceção das ocorrências de talco e calcita. O PT – 05, primeiro que visualmente recebe efluentes da mineração de carvão, apresenta uma tendência totalmente diferente. Embora em

análise de RT sua composição mineralógica seja muito similar às dos outros pontos, na análise da fração menor do que 4 μm mudanças drásticas são perceptíveis. Não há mais minerais como quartzo, mica e esmectita – muito comuns nos pontos anteriores. O único mineral detectado pelas análises é a caulinita, um argilomineral 1:1 típico de ambientes de alta lixiviação química. O mesmo processo é observado para os pontos 06 e 07. Esses são os pontos que visualmente parecem mais ácidos e possuem águas e sedimentos alaranjados. Durante o processo de preparação das amostras desses pontos foi constatada a formação de espuma. A ausência de minerais comuns nos outros pontos como a esmectita e a mica podem ser indicativos de baixo pH nas drenagens, levando à lixiviação química para formar minerais como a caulinita.

Trabalhos anteriores já demonstraram o caráter ácido do Arroio Poacá e o caráter neutro do Arroio Candiota. A seguir, a Tabela 20 exemplifica alguns dos trabalhos que mediram o pH dos dois arroios.

Tabela 20: Dados secundários de pH para o Arroio Poacá e Candiota.

Autores	Valores de pH	
	Arroio Poacá	Arroio Candiota
Fiedler & Solari, 1988	3.1 – 3.6	Sem medição
Cientec, 1990	3.4 – 4.0	7.0
Streck <i>et al.</i> , 1999	4 – 6	6 – 7
Hoffmann, 2003	3.8 – 6.7	6.0 – 6.8
Oliz <i>et al.</i> , 2014	Sem medição	6.0 – 7.0
Fernandes, 2017	3.4 – 7.4	6.0 – 8.0

As medições supracitadas foram realizadas ao longo do curso dos arroios. Os valores mais baixos de pH para o Arroio Poacá foram obtidos onde o corpo d'água recebe mais influência dos efluentes da mineração, enquanto que seus valores neutros foram medidos a jusante do arroio, onde este encontra o Arroio Candiota e ocorre a mistura de águas. O baixo pH observado no Arroio Poacá é um fator preocupante, pois pode mudar totalmente a dinâmica química e facilitar a mobilização de elementos nocivos, como os metais pesados.

Os resultados químicos foram comparados com outros trabalhos realizados na região (Hoffmann, 2003; Teixeira *et al.* 2003) e se mostraram satisfatórios, tendo apresentado correlações significativas com esses, as quais são discutidas a seguir.

A figura a seguir (Figura 52) ilustra as variações presentes na química dos elementos maiores dos sedimentos de fundo de ambos os arroios. Tanto a sílica como o ferro apresentam grandes variações nos pontos amostrados e analisados. Além destes dois elementos, o gráfico permite visualizar a discrepância na concentração do magnésio e do cálcio no PT - 03, como já discutido anteriormente. O restante dos elementos não tem variação considerável de suas concentrações.

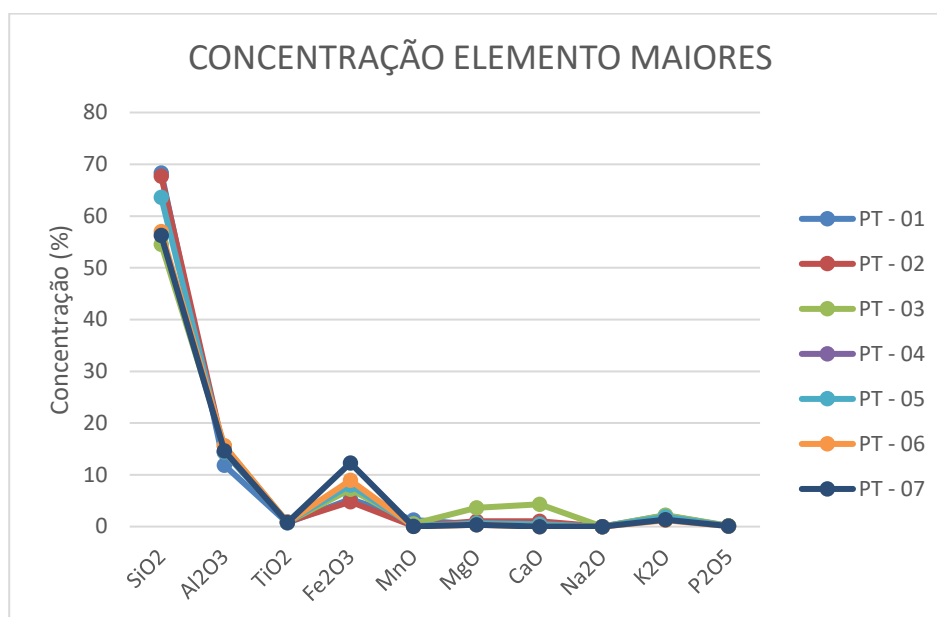


Figura 52: Variação das concentrações de elementos maiores nos arroios estudados.

A concentração da sílica (SiO₂) ao longo das drenagens tem a tendência de decrescer à medida que se avança em direção à foz dos arroios (Figura 53). Isso pode ser explicado tanto pela maior facilidade que minerais resistentes silicatados tem para se depositarem -devido às suas densidades e hábitos cristalinos-, tanto pelo consumo químico da sílica no processo de degradação dos minerais que estão sendo transportados. O consumo dos minerais primários das rochas para a formação de argilominerais durante o processo de intemperismo leva ao consumo de parte da sílica presente na estrutura cristalina de feldspatos e micas, liberando-a para o ambiente na forma de ácido silícico.

8 – DISCUSSÕES

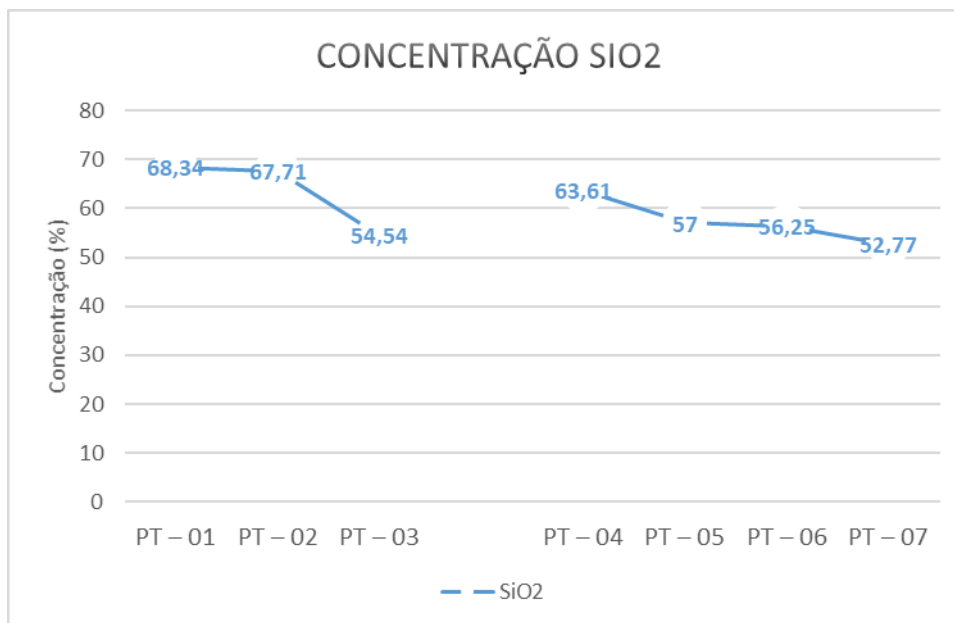


Figura 53: Concentração de sílica (SiO_2) nos sedimentos de fundo ao longo das drenagens.

A concentração do ferro é consideravelmente maior no Arroio Poacá (Figura 54), sobretudo nos pontos mais influenciados pela mineração do carvão. O ferro aparece tanto em suspensão, como no fundo, tendo preferência por este último, apesar de ser também abundante nos sedimentos de suspensão. É interessante observar que no PT – 02 há um grande aumento na concentração do ferro nos sedimentos de suspensão e uma grande diminuição do mesmo nos sedimentos de fundo. Também no PT – 07 observa-se a mesma tendência.

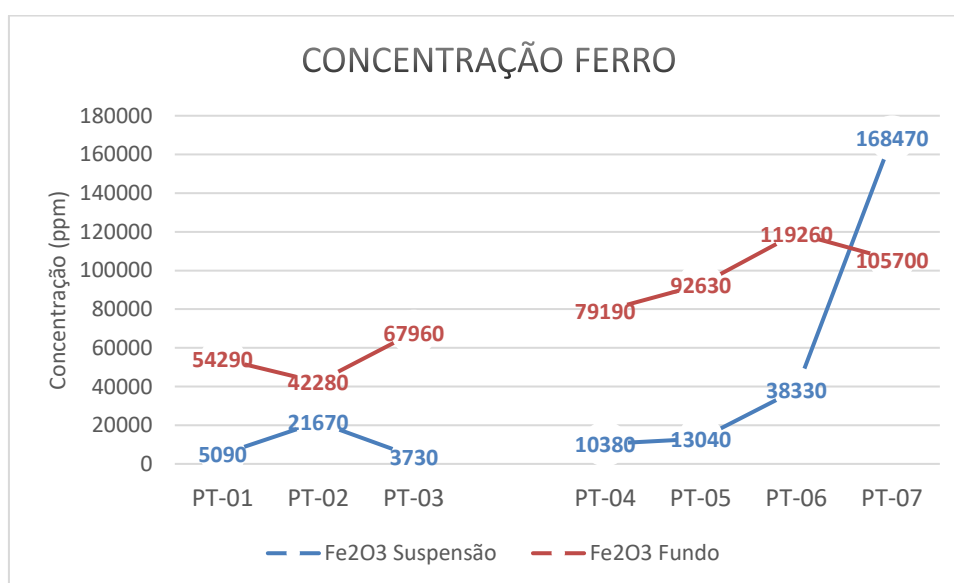


Figura 54: Concentração de ferro (Fe_2O_3) nos sedimentos de fundo vs sedimento de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.

Seguindo a mesma tendência do ferro, o enxofre, clássico contaminante de áreas carvoeiras, também tem suas concentrações elevadas nos pontos que recebem os efluentes da mineração de carvão (Figura 55). Os sedimentos de suspensão, sobretudo, parecem ser a matriz que mais retém o enxofre quando expostos aos efluentes da mineração (PT – 06 e PT – 07).

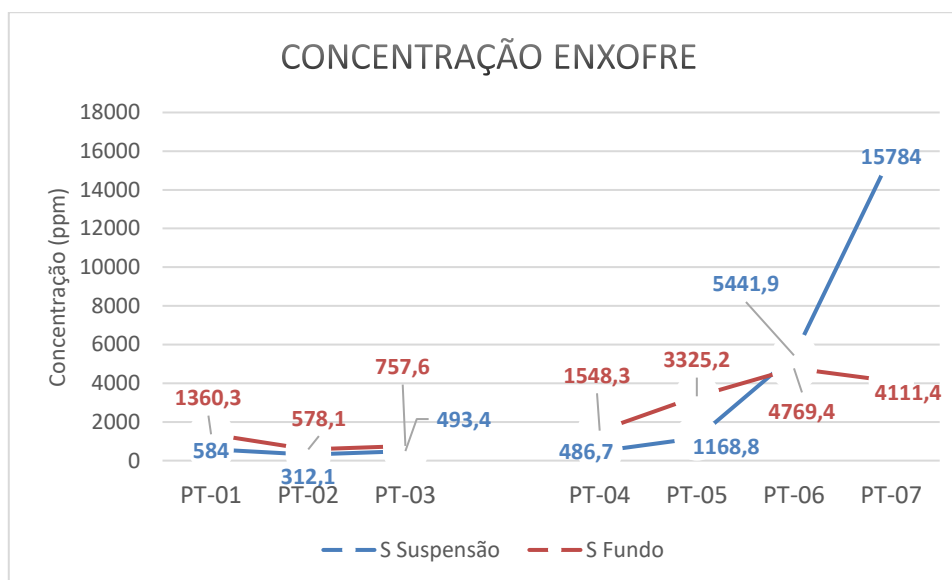


Figura 55: Concentração de enxofre nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.

O cromo e o arsênio, como pode ser observado na Figura 56, têm a tendência de estarem mais concentrados nos sedimentos de fundo. Uma característica interessante de se observar no arsênio é que quando a concentração diminui nos sedimentos de fundo, ela aumenta nos sedimentos de suspensão. Assim como o ferro e o enxofre, o arsênio, nos sedimentos de suspensão, tende a ser mais concentrado nos pontos que recebem maior influência da mineração do carvão. O cromo tem um grande incremento na sua concentração nos sedimentos de suspensão do PT – 01 para o PT – 02 e o PT – 03. Esse aumento poderia ser gerado por contribuição da usina termelétrica durante o processo de ejeção das cinzas pela sua chaminé, ou de atividades vizinhas não identificadas, como a agricultura.

8 – DISCUSSÕES

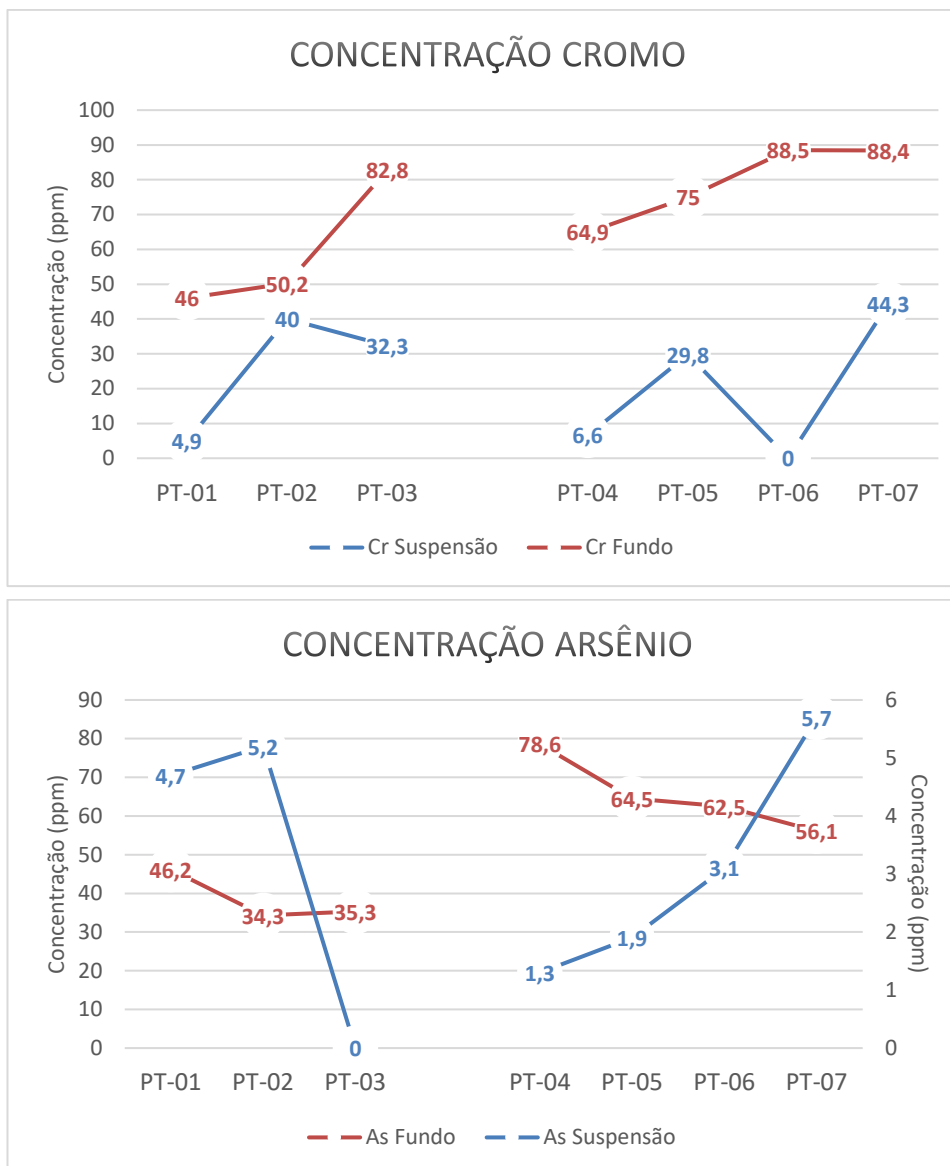


Figura 56: Concentração dos elementos Cr e As nos sedimentos de fundo e de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.

O cádmio é outro metal pesado muito importante por ser comum nas contaminações geradas pela indústria carvoeira. No presente estudo, o cádmio não foi detectado em nenhum ponto nos sedimentos de fundo (Figura 57). No entanto, o mesmo foi detectado em todas as amostras de sedimentos de suspensão. Tal resultado poderia indicar a preferência do elemento pelos sedimentos de suspensão.

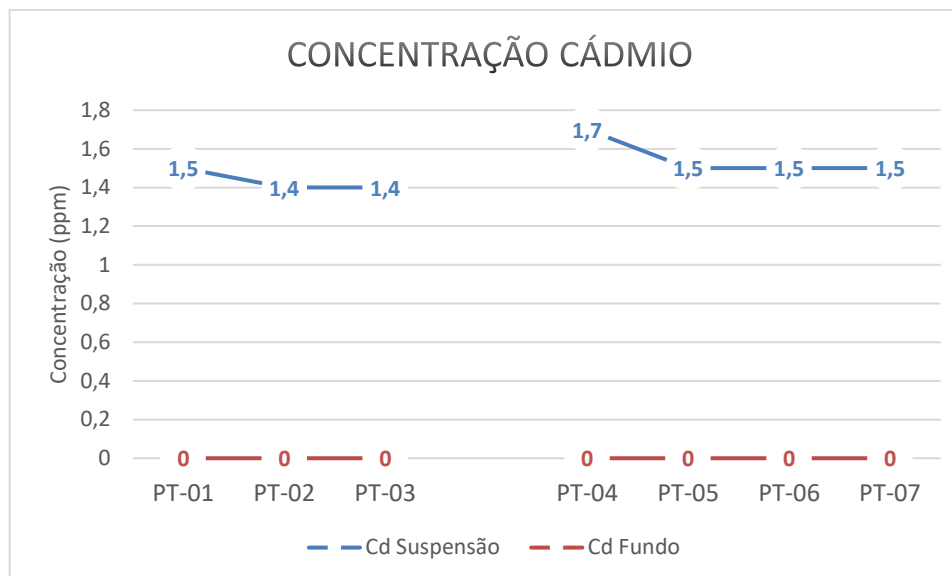


Figura 57: Concentração do cádmio nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.

A tabela a seguir (Tabela 21) contém dados comparativos entre a química do carvão e suas cinzas com os dados obtidos no presente estudo.

Tabela 21: Comparação entre a química do carvão e de suas cinzas com a média encontrada em cada um dos materiais analisados em cada um dos arroios. Os resultados estão em ppm. Os dados químicos do carvão, das cinzas leves e das cinzas pesadas foram retirados de Pires et al. 2001.

Elementos	Carvão	Cinzas Leves	Cinzas Pesadas	Média Arroio Candiota		Média Arroio Poacá	
				Fundo	Suspensão	Fundo	Suspensão
Fe	16.300	46.300	76.800	54.843,3	10.163,3	99.195,0	57.555,0
S	9600	800	100	898,7	463,2	3438,6	5720,4
V	59,7	78,2	92,9	95,4	8,0	125,9	11,4
Cr	25,9	51,1	47,3	59,7	25,7	79,2	20,2
Mn	534,4	614,3	991,2	6986,7	503,3	417,5	695,0
Co	10,1	16,2	17,5	19,0	0,2	9,4	1,2
Ni	17,1	26,6	17,5	33,2	10,8	13,4	9,8
Cu	20,1	31,1	31,8	72,9	44,4	15,3	74,7
Zn	85,1	76,9	47,1	78,8	8773,0	66,8	620,6
As	4,4	17,7	1,8	38,6	3,3	65,4	3,0
Cd	0,1	1,2	0,3	0,0	1,4	0,0	1,6
Ba	152,3	283,9	278,9	947,7	14895,1	342,3	1492,9
Pb	20,5	41,1	19,2	0,0	14,5	0,0	10,8
U	3,3	6,0	6,1	3,8	0,1	5,0	1,3

As observações (Angelidis & Grimanis, 1989) realizadas a partir dos dados expressos na tabela anterior possibilitam algumas comparações. Por exemplo, a concentração do ferro medida nos sedimentos do Arroio Poacá está muito mais elevada do que no Arroio Candiota e até mesmo mais elevada do que na própria cinza do carvão. Isto poderia indicar que a concentração de ferro nesse arroio tem influência das cinzas da termelétrica e não só da mineração do carvão. O cádmio tem teor de 1,2 ppm nas cinzas leves. Em ambos os arroios o mesmo elemento não foi detectado nos sedimentos de fundo, mas teve concentração medida de aproximadamente 1,5 ppm nos sedimentos de suspensão de ambos os arroios. A correlação é forte e tal característica pode indicar a contribuição das cinzas leves na composição dos sedimentos de suspensão de ambos os arroios. O enxofre, tanto nos sedimentos de suspensão, como nos sedimentos de fundo, tem concentrações muito elevadas no Arroio Poacá, assim como o carvão tem concentrações muito elevadas do mesmo elemento. Essa correlação é mais um indicativo de que é possível que o enxofre em excesso nos sedimentos do Arroio Poacá seja contribuição direta da mineração de carvão. Além da mineração de carvão, o aterro sanitário na região também poderia ser fonte de enxofre.

Alguns elementos aparecem com estranhas concentrações nos sedimentos de suspensão. São eles o bário e o zinco (Figura 58 e Figura 59). Suas concentrações fogem da tendência dos arroios e talvez estejam ligadas de alguma forma à usina termelétrica.

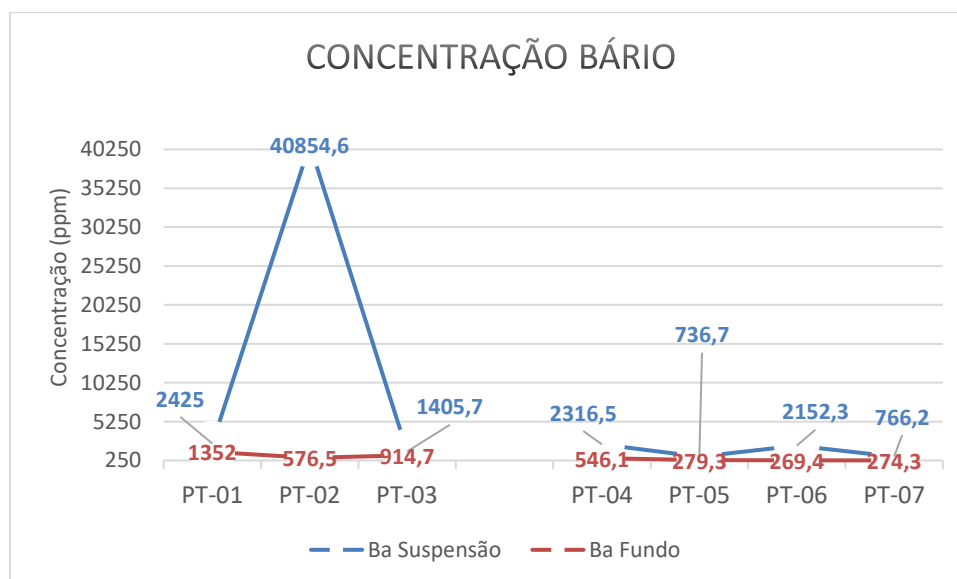


Figura 58: Concentração do bário nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.

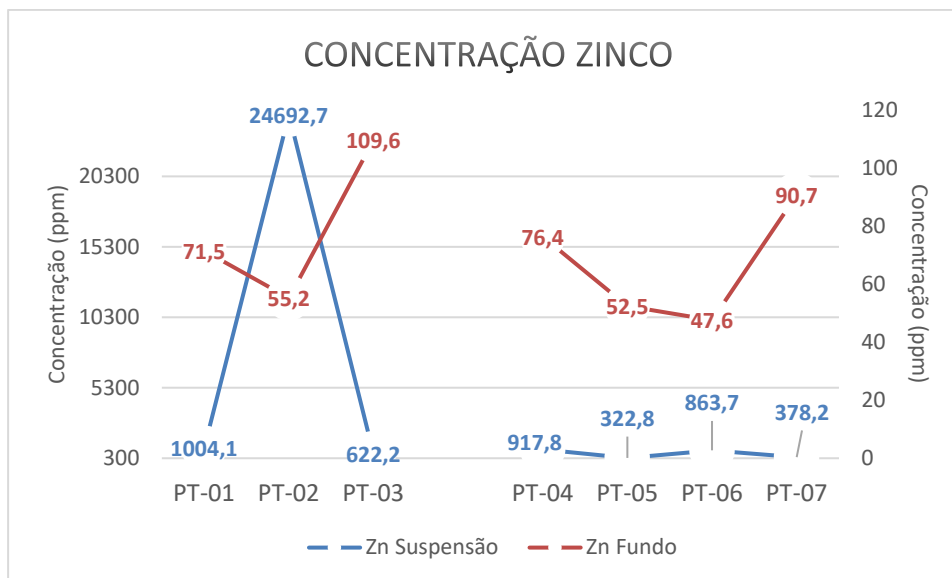


Figura 59: Concentração do zinco nos sedimentos de fundo vs sedimentos de suspensão ao longo das drenagens de ambos os arroios.

As normativas tanto nacionais quanto internacionais pouco contemplam a categoria de sedimentos. A única normativa encontrada que abrange essa matriz é a Nova Lista Holandesa, porém não faz diferenciação entre os sedimentos de suspensão e de fundo. Grandes normativas como a EPA 2018 (*Environmental Protection Agency*), a CONAMA 420/2009 (Conselho Nacional do Meio Ambiente) e CETESB 2016 (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) não contemplam os sedimentos como fontes possíveis de contaminação ou alvo de cuidados ambientais e remediações. Portanto, os resultados obtidos nesse estudo são comparados apenas com a Nova Lista Holandesa.

A seguir, a Tabela 22 contém os dados normativos da Nova Lista Holandesa usados comparativamente neste trabalho. A partir da observação e comparação deles é possível constatar que diversos elementos estão com concentrações acima daquelas consideradas limites.

O Arroio Candiota apresenta concentrações acima do nível de intervenção para o bário tanto nos sedimentos de fundo, como nos sedimentos de suspensão. Além do bário, o zinco está acima do limite nos sedimentos de suspensão do PT – 01 e do PT – 02. Ainda, diversos elementos estão em concentrações acima do valor alvo, mas abaixo do valor de intervenção. São eles o cádmio -apenas nos sedimentos de suspensão, como já discutido previamente-, cobalto, cobre, níquel e vanádio nos sedimentos de fundo, à exceção do cobre que está acima do valor alvo também nos sedimentos de suspensão do PT – 03.

8 – DISCUSSÕES

Tabela 22: Comparação das concentrações obtidas no presente estudo com os valores indicados pela normativa da Nova Lista Holandesa.

Elementos	Nova Lista Holandesa		Arroio Candiota (ppm)						Arroio Poacá (ppm)							
	Valor Alvo (mg/kg)	Valor de Intervenção (mg/kg)	Fundo			Suspensão			Fundo				Suspensão			
			01	02	03	01	02	03	04	05	06	07	04	05	06	07
Arsênio	29	55	46,2	34,3	35,3	4,7	5,2	0	78,6	64,5	62,5	56,1	1,3	1,9	3,1	5,7
Bário	160	625	1352	576,5	914,7	2425	40854,6	1405,7	546,1	279,3	269,4	274,3	2316,5	736,7	2152,3	766,2
Cádmio	0,8	12	Nd	Nd	Nd	1,5	1,4	1,4	Nd	Nd	Nd	Nd	1,7	1,5	1,5	1,5
Crômio	100	380	46	50,2	82,8	4,9	40	32,3	64,9	75	88,5	88,4	6,6	29,8	0	44,3
Cobalto	9	240	34,7	8,3	13,9	0,1	0,5	0,1	14,6	4,2	5,3	13,4	0,2	0,3	0,8	3,4
Cobre	36	190	103,8	40,7	74,1	27,2	29,9	76,1	33,7	11,8	5,7	10	30,9	43,9	26,7	197,1
Chumbo	85	530	Nd	Nd	Nd	14,1	26,3	3,1	Nd	Nd	Nd	Nd	3,7	0	25,4	14,2
Níquel	35	210	36,2	20,8	42,5	10,4	10,9	11,2	16,3	9,5	4,6	23,3	9,4	10,6	10,4	8,8
Vanádio	42	250*	88,4	90,6	107,1	2,3	16,5	5,1	124,8	120,6	131,8	126,5	6,3	7,6	3,2	28,3
Zinco	140	720	71,5	55,2	109,6	1004,1	24692,7	622,2	76,4	52,5	47,6	90,7	917,8	322,8	863,7	378,2

LEGENDA

	Valores normais
	Valores acima do valor alvo
	Valores acima do valor de intervenção

* O vanádio não tem valor de intervenção, mas sim valor indicativo de séria contaminação.

O Arroio Poacá apresenta contaminação em arsênio nos sedimentos de fundo, tendo superado os valores de intervenção em todos os pontos. Já o bário está acima do valor alvo para o sedimento de fundo de todos os pontos e acima do valor de intervenção para o sedimento de suspensão de todos os pontos. O cádmio, da mesma forma que no Arroio Candiota e como já discutido anteriormente, apresenta valores acima do valor alvo apenas nos sedimentos de suspensão, não tendo sido detectado nos sedimentos de fundo. O cobalto apresenta concentração levemente acima do valor alvo nos sedimentos de fundo em dois pontos (PT – 04 e PT – 07). Já o cobre, no PT – 05 está acima do valor alvo, enquanto no PT – 07 está acima do valor de intervenção, ambos para os sedimentos de suspensão. Além destes elementos, o Arroio Poacá tem valores acima do valor alvo para o vanádio, nos sedimentos de fundo, e acima do valor de intervenção para o zinco, nos sedimentos de suspensão do PT – 04 e PT – 06. O PT – 05 e PT – 07 têm valores de zinco acima do valor alvo para os sedimentos de suspensão.

Para melhor localização espacial da contaminação, foi confeccionado um mapa da distribuição da mesma. A Figura 60, a seguir, contém um mapa da região com os pontos de amostragem e quais as suas respectivas contaminações de acordo com a Nova Lista Holandesa.

8 – DISCUSSÕES

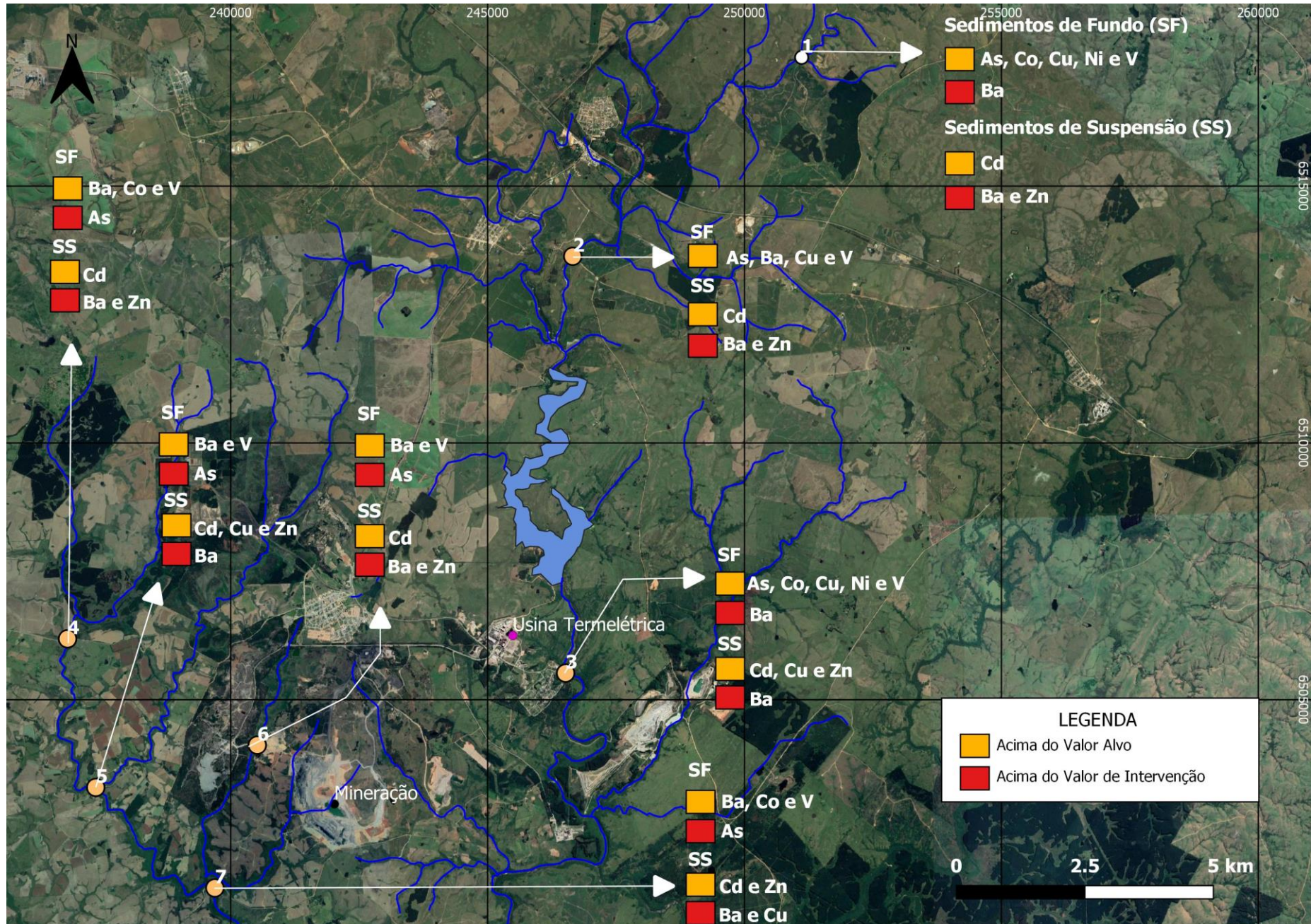


Figura 60: Distribuição das contaminações de acordo com a Nova Lista Holandesa.

8 – DISCUSSÕES

A escolha do *background* foi feita levando em consideração uma série de variáveis que pudessem afetar a qualidade dos sedimentos nessa área. No entanto, ainda assim, foi possível constatar a ocorrência de elementos em concentrações bastante elevadas quando comparados com as normais existentes (Tabela 23).

Tabela 23: Valores de referência para limites de concentração de metais em solos

Elementos	As	Ba	Cd	Cr	Co	Cu	Zn
<i>Background</i> fundo	46,2	1352	0	46	34,7	103,8	71,5
<i>Background</i> suspensão	4,7	2425	1,5	4,9	0,1	27,2	1004,1
EPA (solos – investigação residencial)	0,68	15000	71	120000 (III) e 0,3 (VI)	23	3100	-
CONAMA 420/ 2009 (solos – investigação agrícola)	35	300	3	150	35	200	450
Nova Lista Holandesa (sedimentos)	55	625	12	380	240	190	720
CETESB 2016 (solo – investigação agrícola)	35	500	3,6	150	35	760	1900

Para a comparação na tabela anterior, foram escolhidos os valores de concentração para a investigação agrícola uma vez que a maior parte da área afetada pelos rios tem como uso a produção agrícola e pecuária. Como apenas a Nova Lista Holandesa contempla a categoria de sedimentos, para as outras foram escolhidos para comparação os valores propostos para solos. A partir do que foi apresentado na tabela anterior, é possível concluir que o ponto considerado *background* neste trabalho apresenta concentrações acima do estabelecido como adequado por algumas normativas, por exemplo, arsênio, bário, cobalto e zinco. As altas concentrações no *background* podem afetar os resultados dos índices geoquímicos, isto é, para determinado ponto de amostragem alguns dos elementos podem ser classificados como empobrecidos e não contaminados por terem menores concentrações do que o *background*, sem, no entanto, terem concentrações menores do que as normativas, sendo, portanto, contaminados segundo as mesmas. É possível que o ponto esteja nessa condição por influência da termelétrica, ou mesmo da agricultura.

9 CONCLUSÕES

O estudo realizado nos arroios da região de Candiota permitiu identificar os tamanhos dos sedimentos transportados pelos arroios, a mineralogia que compõe esses sedimentos e as concentrações dos elementos alvos do estudo tanto nos sedimentos de fundo, como nos sedimentos de suspensão. A partir desses resultados, foram feitas correlações entre o tamanho do grão, a mineralogia e a geoquímica, permitindo constatações acerca das concentrações obtidas, bem como a comparação com normativas existentes.

O estudo granulométrico e mineralógico foi importante no momento de avaliar quais pontos estão mais vulneráveis a reter elementos nocivos nas estruturas dos minerais. Ainda, o estudo mineralógico ajudou a entender algumas das concentrações anômalas que apareceram em alguns pontos.

O estudo geoquímico permitiu a identificação de tendências de elementos que comumente estão relacionados à indústria carvoeira. O ferro e o enxofre, por exemplo, nos pontos com influência direta da mineração de carvão apresentaram concentrações muito acima das concentrações obtidas nos outros pontos. Além disso, foi possível constatar que os arroios estão contaminados com diversos elementos. O Arroio Candiota está contaminado por bário e zinco, enquanto o Arroio Poacá apresenta contaminação por arsênio, bário, cobre e zinco.

O emprego dos índices geoquímicos foi interessante para observar tendências de perda ou ganho de elementos durante o processo de transporte, facilitando a identificação de algumas possíveis fontes de contaminação. No entanto, os mesmos índices não podem ser usados para demonstrar que há real contaminação com risco à biota, uma vez que são comparativos a um *background* e este pode também estar contaminado, ou muito empobrecido. Portanto, é imprescindível recorrer às comparações com estudos toxicológicos já realizados, buscando avaliar neles e em normativas o risco e periculosidade das concentrações.

Na busca por normativas para fazer a comparação das concentrações, foi observado que no Brasil não existem normativas que levem em consideração as concentrações químicas nos sedimentos e muito menos há distinção entre sedimentos de fundo e sedimentos de suspensão. A única normativa encontrada que considera os sedimentos foi a Nova Lista Holandesa, no entanto, a mesma não distingue as duas classes.

Como observado ao longo do capítulo de resultados e discussões, o entendimento do comportamento dos elementos entre as duas classes de sedimentos é importante pois é uma característica fundamental para melhorar a compreensão acerca da mobilidade deles dentro do ecossistema. Além disso, a Nova Lista Holandesa não tem valores nem de enxofre e nem de ferro para os sedimentos, elementos essenciais no estudo da contaminação por carvão.

9 – CONCLUSÕES

A escolha do *background* é um processo de alta complexidade e que depende de inúmeras variáveis. Mesmo com intenso trabalho pré-campo para tentar entender as variáveis controladoras das contaminações nas áreas, foi constatado que o ponto considerado branco não estava isento de intervenções externas, ou seja, apresenta características de impacto de origem antrópica. Tal resultado reflete a dificuldade da locação de um ponto branco em uma zona de intensa exploração por diversos tipos de empreendimentos. A região se mostrou bastante impactada, não só no entorno dos centros industriais que neste trabalho foram monitorados, mas também em áreas tão afastadas como o PT – 01, escolhido como *background*. Portanto, é importante o aprofundamento do estudo para aperfeiçoar a escolha de um *background*.

As técnicas de FRX utilizadas nas análises químicas neste trabalho estão sendo desenvolvidas pelo CPGq com intuito de desenvolver a metodologia para estudos ambientais. De maneira geral, a técnica se mostrou bastante eficaz e um ótimo recurso para trabalhos que visem a determinação das condições ambientais em grandes áreas. Os resultados obtidos para o elemento bário estão sendo refeitos e testados pelo laboratório devido aos seus altos valores e à sua relevância ambiental.

As formas de continuação e aprofundamento da pesquisa incluem a densificação da malha de pontos de amostragem utilizando as mesmas técnicas que neste trabalho foram empregadas. Posteriormente, a escolha de pontos importantes para que sejam realizadas análises químicas por meio de técnicas que utilizem ICP (*Inductively Coupled Plasma*) de forma a aprofundar a quantificação dos elementos de interesse.

10 REFERÊNCIAS

ANGELIDIS, Michael; GRIMANIS, Apostolos P. Geochemical partitioning of Co, Cr, Fe, Sc and Zn in polluted and non-polluted marine sediments. **Environmental Pollution**, v. 62, n. 1, p. 31-46, 1989.

APHA, Awwa. WPCF, Standard methods for the examination of water and wastewater. **American Public Health Association, Washington, DC**, 1995.

ARMANNSSON, H. et al. Trace metals and hydrocarbons in sediments from the Southampton water region, with particular reference to the influence of oil refinery effluent. **Marine environmental research**, v. 15, n. 1, p. 31-44, 1985.

BERGAMASCHI, Luigi et al. Determination of trace elements and evaluation of their enrichment factors in Himalayan lichens. *Environmental pollution*, v. 120, n. 1, p. 137-144, 2002.

BRASILEIRO, Balanço Mineral. Ministério de Minas e Energia. **Ano base**, 2001.

BRIMBLECOMBE, P. INDUSTRIAL AIR POLLUTION IN THIRTEENTH-CENTURY BRITAIN. *Weather*, v. 30, n. 12, p. 388-396, 1975.

CAMARGO, Odilon A. et al. Atlas eólico: Rio Grande do Sul. **Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC**, 2002.

CAMPANER, Veridiana Polvani et al. Processos físico-químicos em drenagem ácida de mina em mineração de carvão no sul do Brasil. **Química Nova**, 2009.

CAPELETTO, Gilberto José. Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2015: ano base 2014/ Gilberto José Capeletto e Gustavo Humberto Zanchi de Moura. -Porto Alegre, Grupo CEEE / Secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul, 2015.

CORREA, K. C. R.; GARCIA, S. A.; JABLONSKI, A. The environmental situation of the coal region in the Rio Grande do Sul State, Brazil; Situação ambiental da região do carvão no Estado do Rio Grande do Sul-Brasil. 1997.

DA CUNHA, Noel Gomes et al. Estudo dos solos do município de Candiota. **Embrapa Clima Temperado-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1998.

DATTA, Dilip K.; SUBRAMANIAN, V. Distribution and fractionation of heavy metals in the surface sediments of the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system in the Bengal basin. *Environmental Geology*, v. 36, n. 1-2, p. 93-101, 1998.

DE FARIAS, Roberto Nascimento et al. Análise morfométrica e de usos do solo da bacia hidrográfica do Arroio Candiota, RS, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 2, p. 159-172.

DIAS, Yan Resing et al. CARACTERIZAÇÃO PRÉVIA DAS CINZAS VOLANTES, COPRODUTO DA GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO MINERAL DE CANDIOTA-RS. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 8, n. 2, 2017.

DO AMARAL, José Eduardo; KREBS, Antonio Silvio J. Drenagem ácida da mineração de carvão e sua interrelação com metais pesados e recarga de aquíferos na Bacia Carbonífera do Estado de Santa Catarina. **Águas Subterrâneas**, 2010.

DO BRASIL, Divisão Territorial. Divisão Territorial do Brasil e Limites Territoriais. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)(1 de julho de 2008).

DOMINIK, J.; MANGINI, A.; PROSI, F. Sedimentation rate variations and anthropogenic metal fluxes into Lake Constance sediments. **Environmental Geology**, v. 5, n. 3, p. 151-157, 1983.

DUARTE, ROGÉRIA P. SAEZ; PASQUAL, ANTENOR. Avaliação do cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn) em solos, plantas e cabelos humanos. **Energia na agricultura**, v. 15, n. 1, p. 46-58, 2000.

DUCE, Robert A.; HOFFMAN, Gerald L.; ZOLLER, William H. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural?. *Science*, v. 187, n. 4171, p. 59-61, 1975.

DUTRA, C. V.; GOMES, Celso B. A fluorescência de raios X na geologia. Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia, p. 84-120, 1984.

FIGUEIREDO, Bernardino R. et al. Medical geology studies in South America. In: **Medical Geology**. Springer, Dordrecht, 2010. p. 79-106.

FLUES, Marlene et al. Avaliação da influência da operação da termoelétrica a carvão na concentração dos metais e as no solo de Figueira, PR-Brasil Evaluation of the

influence of a coal plant operation on metal and as concentrations in the soil of Figueira, PR-Brazil. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 25-30, 2008.

Geomedicina no Paraná (in Portuguese) Geomedicine in the State of Paraná Edition: 1 Chapter: 1 Publisher: SETI IPPP MINEROPARE Editors: Bonald C. Figueiredo, Humberto C. Ibañez.

GONÇALVES, Teresinha Maria; FOLLMANN, José Ivo; PHILOMENA, Gerson Luiz Boer. Aspectos da cultura do carvão em Criciúma (SC): a história que não se conta. **História Unisinos**, v. 16, n. 2, p. 244-255, 2012.

GRESENS, Randall L. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical geology*, v. 2, p. 47-65, 1967.

HASENACK, H.; Weber, E.(org.) Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3).

IGLESIAS, Carlos Moacyr da Fontoura et al. Geologia e recursos minerais da folha Passo São Diogo, SH. 22-YC-IV. 2018.

KATSIFARAKIS, K. L. et al. **Protection and Restoration of the Environment IV. Proceedings of an International Conference, Halkidiki, Macedonia, Greece. Volume 2.** STEVENS INST OF TECH HOBOKEN NJ, 1998.

LANGE, Camila Neves. **Contaminação do solo e mobilidade de As, Cd, Mo, Pb e Zn em colunas de solo franco arenoso com cinza de carvão.** 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LICHT, Otávio Augusto Boni. A geoquímica multielementar na gestão ambiental: identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no estado do Paraná, Brasil. 2001.

LORING, D. H. Lithium—a new approach for the granulometric normalization of trace metal data. *Marine Chemistry*, v. 29, p. 155-168, 1990.

LOSKA, K. et al. Assessment of arsenic enrichment of cultivated soils in Southern Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 12, n. 2, p. 187-192, 2003.

LOSKA, Krzysztof et al. Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 93, n. 1-4, p. 347-365, 1997.

LUIZ-SILVA, Wanilson et al. Variabilidade espacial e sazonal da concentração de elementos-traço em sedimentos do sistema estuarino de Santos-Cubatão (SP). *Química Nova*, 2006.

LUNKES, Maiquel Kochhann. O Carvão das camadas superiores e inferiores da jazida de Candiota-RS: uma contribuição para sua caracterização química, petrológica e tecnológica visando seu potencial na geração de energia elétrica. 2010.

MANDAL, A.; SENGUPTA, D. An assessment of soil contamination due to heavy metals around a coal-fired thermal power plant in India. *Environmental Geology*, v. 51, n. 3, p. 409-420, 2006.

MORSCH, V. M.; MENEGOTTO, E.; MARTINS, A. F. CÁDMIO EM SOLOS E SEDIMENTOS DAS REGIÕES CARBOENERGÉTICAS DE CANDIOTA E DE CHARQUEADAS. *Geochimica Brasiliensis*, v. 7, n. 1, 1993.

MORTATTI, Jefferson; HISSLER, Christophe; PROBST, Jean-Luc. Distribuição de metais pesados nos sedimentos de fundo ao longo da bacia do Rio Tietê. *Geologia USP. Série Científica*, v. 10, n. 2, p. 3-11, 2010.

MULLER, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, v. 2, p. 108-118, 1969.

NIMER, Edmon. *Climatologia do Brasil*. IBGE, 1989.

NRIAGU, Jerome O. et al. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *nature*, v. 333, n. 6169, p. 134-139, 1988.

OYHANTÇABAL, Pedro et al. The Nico Pérez Terrane of Uruguay and Southeastern Brazil. In: *Geology of Southwest Gondwana*. Springer, Cham, 2018. p. 161-188.

PACYNA, Jozef M.; WINCHESTER, John W. Contamination of the global environment as observed in the Arctic. *Global and Planetary Change*, v. 2, n. 1-2, p. 149-157, 1990.

PANDEY, Bhanu; AGRAWAL, Madhoolika; SINGH, Siddharth. Ecological risk assessment of soil contamination by trace elements around coal mining area. *Journal of soils and sediments*, v. 16, n. 1, p. 159-168, 2016.

PERTSEMLI, Eleni; VOUTSA, Dimitra. Distribution of heavy metals in lakes doirani and kerkini, northern Greece. *Journal of Hazardous Materials*, v. 148, n. 3, p. 529-537, 2007.

PIRES, M.; QUEROL, X.; TEIXEIRA, E. C. Caracterização do carvão de Candiota e de suas cinzas. ***Geochimica Brasiliensis***, v. 15, n. 2, 2001.

QUEVAUVILLER, Philippe; LAVIGNE, Renaud; CORTEZ, Leopoldo. Impact of industrial and mine drainage wastes on the heavy metal distribution in the drainage basin and estuary of the Sado River (Portugal). *Environmental Pollution*, v. 59, n. 4, p. 267-286, 1989.

ROY, P. S.; CRAWFORD, E. A. Heavy metals in a contaminated Australian estuary—dispersion and accumulation trend. ***Estuarine, Coastal and Shelf Science***, v. 19, n. 3, p. 341-358, 1984.

SANCHEZ, J. C. D. et al. Estudos da concentração e da mobilidade dos elementos metálicos nas cinzas da Usina Termoeletrica de Candiota. ***Geochimica Brasiliensis***, v. 8, n. 1, 1994.

SANCHEZ, Josete Caetana Dani; FORMOSO, Milton Luiz Laquintine. Utilização do carvão e meio ambiente. In: ***CIENTEC boletim técnico***. CIENTEC, 1990.

SANTSCHI, Peter H. et al. Accumulation of sediments, trace metals (Pb, Cu) and total hydrocarbons in Narragansett Bay, Rhode Island. ***Estuarine, Coastal and Shelf Science***, v. 19, n. 4, p. 427-449, 1984.

SHI, Gao Ling et al. Arsenic, copper, and zinc contamination in soil and wheat during coal mining, with assessment of health risks for the inhabitants of Huaibei, China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, n. 12, p. 8435-8445, 2013.

SHUQAIR, M. S. S. Estudo da contaminação do solo e água subterrânea por elementos tóxicos originados dos rejeitos das minas de carvão de Figueira no Estado do Paraná. ***São Paulo***, 2002.

SIQUEIRA, Gilmar Wanzeller; APRILE, Fábio Marques. Avaliação de risco ambiental por contaminação metálica e material orgânico em sedimentos da bacia do Rio Aurá, Região Metropolitana de Belém-PA. 2013.

TE BRAKE, William H. Air pollution and fuel crises in preindustrial London, 1250-1650. *Technology and Culture*, p. 337-359, 1975.

TEIXEIRA, E. C. et al. A PIXE study of elements transport in fluvial waters in the Candiota region, Rio Grande do Sul, Brazil. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 215, n. 1-2, p. 203-213, 2004.

TEIXEIRA, E. C. et al. A preliminary study of metals in sediments from areas influenced by coal processing and steel industry activities-Baixo Jacui region, RS-Brazil. **Environmental technology**, v. 18, n. 6, p. 581-591, 1997.

TEIXEIRA, E. et al. Distribution of selected heavy metals in fluvial sediments of the coal mining region of Baixo Jacuí, RS, Brazil. *Environmental Geology*, v. 41, n. 1-2, p. 145-154, 2001.

TEIXEIRA, Wilson et al. **Decifrando a terra**. Oficina Textos, 2001.

WOITKE, P. et al. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube. *Chemosphere*, v. 51, n. 8, p. 633-642, 2003.

YAQIN, J. I. et al. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China. *Journal of Environmental Sciences*, v. 20, n. 5, p. 571-578, 2008.

11 ANEXOS

11.1 Anexo I: Tabelas de granulometria

Proveta	-		Peso Inicial da Amostra (g)	154,45
Programa	TCC		Peso Final da Amostra (g)	154,3253
Nº Amostra	PT-01			
Escala (mm)	Material (g)	Frequência		Fração
		% simples	% acumulada	
16	13,6080	8,8177	8,8177	Seixo
8	10,2988	6,6734	15,4912	Seixo
4	24,0715	15,5979	31,0891	Seixo
2	63,2383	40,9773	72,0663	Grânulo
1	40,2796	26,1005	98,1668	Areia muito grossa
0,5	2,7871	1,8060	99,9728	Areia grossa
0,25	0,0087	0,0056	99,9784	Areia média
0,125	0,0126	0,0082	99,9866	Areia fina
0,062	0,0090	0,0058	99,9924	Areia muito fina
<0,062	0,0117	0,0076	100,0000	Argila + Silte

32		Peso Inicial da Amostra (g)	95,3600	Especificação dos finos	Peso (g)
TCC		Peso Final Amostra sem finos (g)	78,5800	Copo com material	27,4629
PT-02		Peso Inicial de finos (g)	16,7800	Copo vazio	27,3224
		Peso Final de Grossos (g)	78,5289	Defloculante	0,0087
		Peso Total Final da Amostra (g)	95,3089	x50	6,5900
Material (g)	Frequência		Fração		
	% simples	% acumulada			
18,1212	19,0131	19,0131	Seixo		
10,9984	11,5397	30,5529	Seixo		
10,8254	11,3582	41,9111	Grânulo		
9,2211	9,6750	51,5861	Areia muito grossa		
10,1359	10,6348	62,2208	Areia grossa		
10,6696	11,1948	73,4156	Areia média		
5,8836	6,1732	79,5888	Areia fina		
2,6737	2,8053	82,3941	Areia muito fina		
10,1900	10,6916	93,0856	Silte		
6,5900	6,9144	100,0000	Argila		

Proveta	9	Peso Inicial da Amostra (g)	192,9900	Especificação dos finos	Peso (g)
Programa	TCC	Peso Final Amostra sem finos (g)	187,1800	Copo com material	27,8694
Nº Amostra	PT-03	Peso Inicial de finos (g)	5,8100	Copo vazio	27,8357
		Peso Final de Grossos (g)	187,3135	Defloculante	0,0087
		Peso Total Final da Amostra (g)	193,1235	x50	1,2500

Escala (mm)	Material (g)	Frequência		Fração
		% simples	% acumulada	
16	33,4915	17,3420	17,3420	Seixo
8	39,6424	20,5270	37,8690	Seixo
4	32,5240	16,8410	54,7100	Seixo
2	24,4264	12,6481	67,3581	Grânulo
1	15,8089	8,1859	75,5440	Areia muito grossa
0,5	23,4371	12,1358	87,6798	Areia grossa
0,25	13,9045	7,1998	94,8796	Areia média
0,125	3,1075	1,6091	96,4887	Areia fina
0,062	0,9712	0,5029	96,9916	Areia muito fina
Silte	4,5600	2,3612	99,3527	Silte
Argila	1,2500	0,6473	100,0000	Argila

Proveta	-	Peso Inicial da Amostra (g)	120,1600	Especificação dos finos	Peso (g)
Programa	TCC	Peso Final Amostra sem finos (g)	-	Copo com material	0
Nº Amostra	PT-04	Peso Inicial de finos (g)	-	Copo vazio	0
		Peso Final de Grossos (g)	119,9680	Defloculante	0
		Peso Total Final da Amostra (g)	119,9680	x50	0,0000

Escala (mm)	Material (g)	Frequência		Fração
		% simples	% acumulada	
16	-	-	-	-
8	3,3701	2,8092	2,8092	Seixo
4	4,8710	4,0602	6,8694	Seixo
2	2,7517	2,2937	9,1631	Grânulo
1	4,3743	3,6462	12,8093	Areia muito grossa
0,5	26,3038	21,9257	34,7350	Areia grossa
0,25	61,9766	51,6609	86,3960	Areia média
0,125	15,8078	13,1767	99,5726	Areia fina
0,062	0,3186	0,2656	99,8382	Areia muito fina
Silte + Argila	0,1941	0,1618	100,0000	Silte + Argila

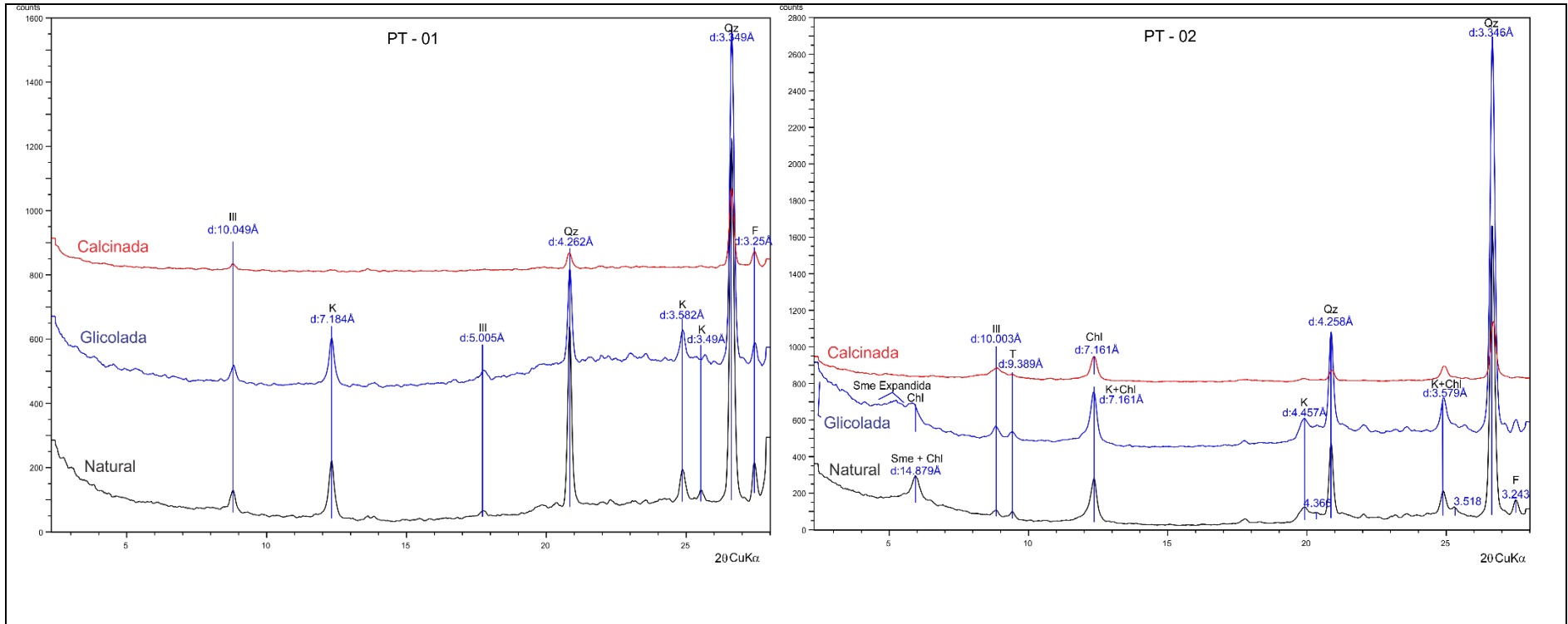
Proveta	89	Peso Inicial da Amostra (g)	161,8000	Especificação dos finos	Peso (g)
Programa	TCC	Peso Final Amostra sem finos (g)	151,6200	Copo com material	27,5322
Nº Amostra	PT-05	Peso Inicial de finos (g)	10,1800	Copo vazio	27,4577
		Peso Final de Grossos (g)	151,9121	Defloculante	0,0087
		Peso Total Final da Amostra (g)	162,0921	x50	3,2900

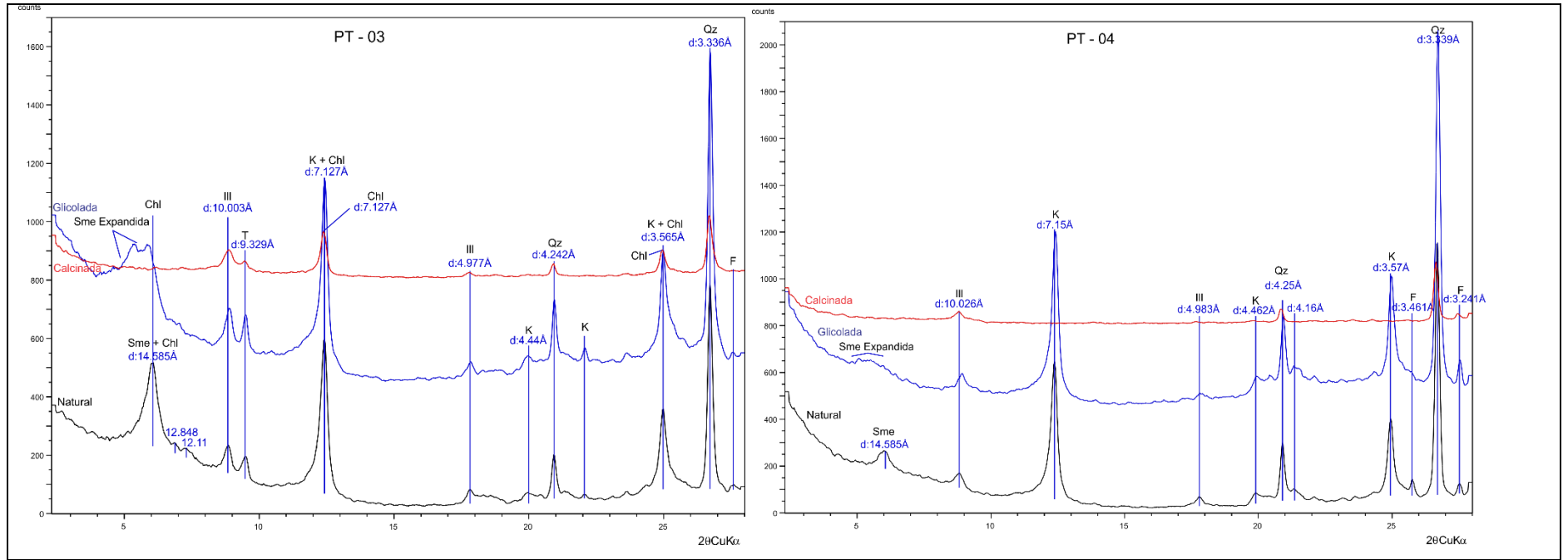
Escala (mm)	Material (g)	Frequência		Fração
		% simples	% acumulada	
16	-	-	-	-
8	11,2540	6,9430	6,9430	Seixo
4	16,7279	10,3200	17,2630	Seixo
2	17,1007	10,5500	27,8130	Grânulo
1	22,6479	13,9722	41,7852	Areia muito grossa
0,5	36,0847	22,2618	64,0470	Areia grossa
0,25	24,4392	15,0774	79,1244	Areia média
0,125	20,4152	12,5948	91,7192	Areia fina
0,062	3,2425	2,0004	93,7196	Areia muito fina
Silte	6,8900	4,2507	97,9703	Silte
Argila	3,2900	2,0297	100,0000	Argila

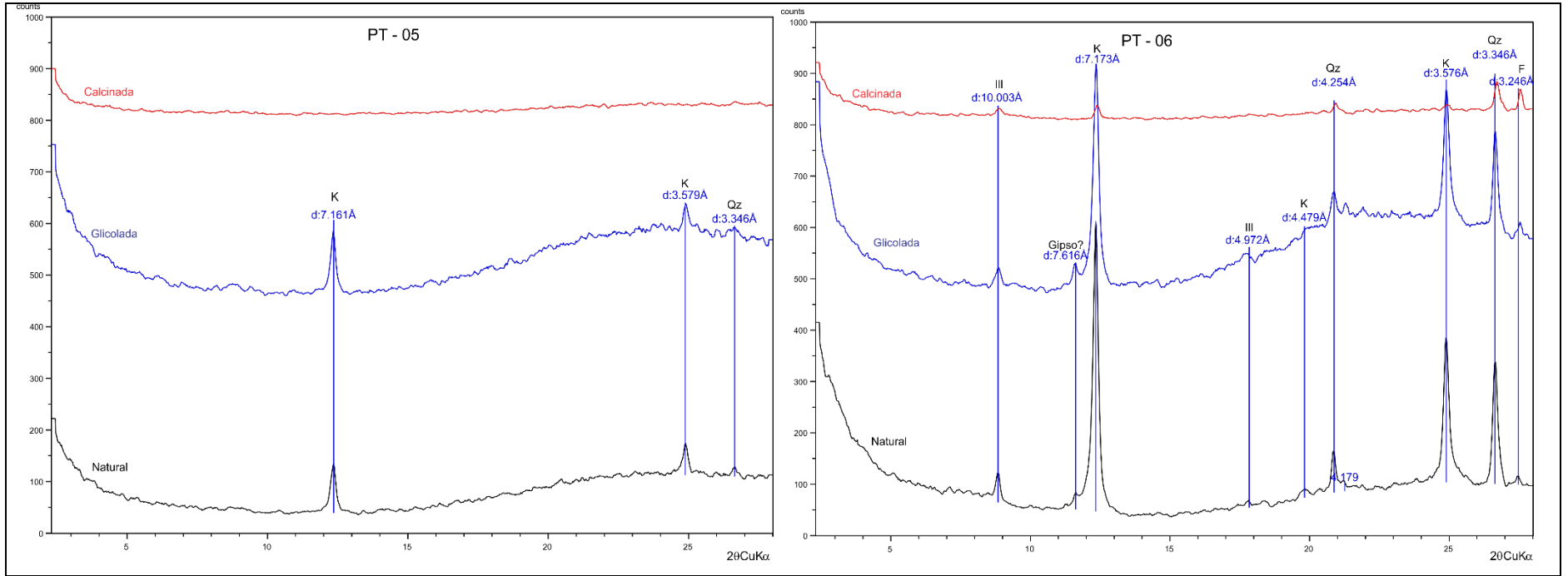
Proveta	-		Peso Inicial da Amostra (g)	108,4400	Especificação dos finos	Peso (g)
Programa	TCC		Peso Final Amostra sem finos (g)	-	Copo com material	0
Nº Amostra	PT-06		Peso Inicial de finos (g)	-	Copo vazio	0
			Peso Final de Grossos (g)	108,3283	Defloculante	0
			Peso Total Final da Amostra (g)	108,3283	x50	0,0000
Escala (mm)	Material (g)	Frequência		Fração		
		% simples	% acumulada			
16	-	-	-	-		
8	-	-	-	-		
4	0,3257	0,3007	0,3007	Seixo		
2	1,0916	1,0077	1,3083	Grânulo		
1	2,1623	1,9961	3,3044	Areia muito grossa		
0,5	18,0354	16,6488	19,9532	Areia grossa		
0,25	69,4163	64,0796	84,0328	Areia média		
0,125	17,0087	15,7011	99,7339	Areia fina		
0,062	0,1414	0,1305	99,8644	Areia muito fina		
Silte + Argila	0,1469	0,1356	100,0000	Silte + Argila		
-	-	-	-	-		

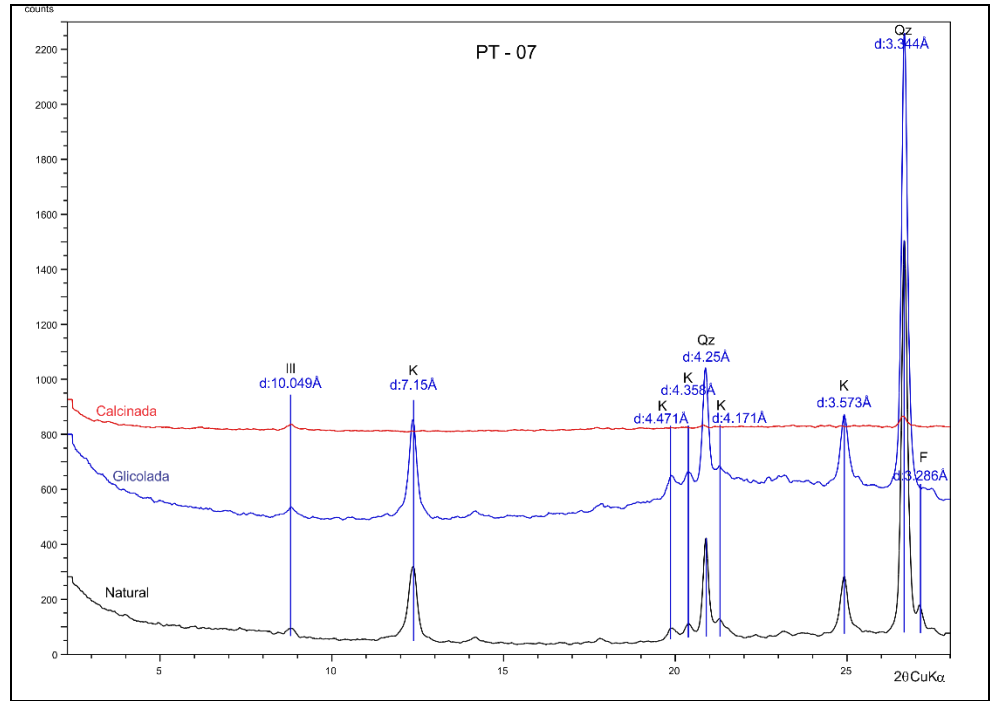
Proveta	36		Peso Inicial da Amostra (g)	146,1400	Especificação dos finos	Peso (g)
Programa	TCC		Peso Final Amostra sem finos (g)	136,6800	Copo com material	27,6858
Nº Amostra	PT-07		Peso Inicial de finos (g)	9,4600	Copo vazio	27,6236
			Peso Final de Grossos (g)	136,7379	Defloculante	0,0087
			Peso Total Final da Amostra (g)	146,1979	x50	2,6750
Escala (mm)	Material (g)	Frequência		Fração		
		% simples	% acumulada			
16	-	-	-	-		
8	38,4786	26,3195	26,3195	Seixo		
4	23,6231	16,1583	42,4778	Seixo		
2	23,2713	15,9177	58,3955	Grânulo		
1	16,3057	11,1532	69,5487	Areia muito grossa		
0,5	18,1645	12,4246	81,9733	Areia grossa		
0,25	13,3478	9,1300	91,1032	Areia média		
0,125	2,6492	1,8121	92,9153	Areia fina		
0,062	0,8977	0,6140	93,5293	Areia muito fina		
Silte	6,7850	4,6410	98,1703	Silte		
Argila	2,6750	1,8297	100,0000	Argila		

11.2 Anexo II: Difratogramas de amostra orientada sem separação da fração menor do que 4 μm .









11.3 Anexo III: Desvio padrão da leitura dos elementos na FRX

Desvio Padrão das Últimas 10 leituras do padrão JG1A:

V	Sn	Th	U	Y	Pb	Ni	Sr	Zr	Zn	Nb	Rb	Cr	Ba
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
4,6769	1,0924	1,0488	1,0489	0,7613	1,4554	1,0503	0,8842	0,6763	0,6783	0,3860	0,8784	2,8434	22,5360

Desvio Padrão das Últimas 10 leituras do padrão AC-E:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,1550	0,0374	0,0053	0,0237	0,0000	0,0166	0,0106	0,1089	0,0267	0,0052