

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

LARISSA TAÍS WAGNER

AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA E
VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO EM UM ATERRO DE RESÍDUOS
INDUSTRIAIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE, RS

Porto Alegre

2018

ARISSA TAÍS WAGNER

AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DO SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA E
VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO EM UM ATERRO DE RESÍDUOS
INDUSTRIAIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE, RS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal do Rio
Grande do Sul para obtenção do grau de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Pedro Viero

Supervisor: Eduardo C. B. Carvalho

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Wagner, Larissa Taís

Avaliação da contaminação do solo e água subterrânea e vulnerabilidade do aquífero em um aterro de resíduos industriais na Região Metropolitana de Porto Alegre, RS. / Larissa Taís Wagner. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

[160 f.] ils.

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientadora: Antônio Pedro Viero

1. Resíduos sólidos. 2. Solos. 3. Aquíferos. 4. Águas subterrâneas. 5. Aterros de resíduos industriais. 6. Contaminação I. Título.

CDU 550.461

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

RESUMO

A concentração da atividade industrial em regiões estratégicas requer a existência de locais apropriados para o descarte dos resíduos oriundos dos mais diversos ramos deste setor. O destino dos resíduos sólidos industriais no cenário atual demanda uma série de cuidados, visto que seu descarte de maneira inadequada é capaz de promover diversos problemas ambientais, no que diz respeito a contaminação dos solos, águas subterrâneas e recursos hídricos, comprometendo os seus usos possíveis. A região do Vale do Rio dos Sinos, que pertence a Região Metropolitana de Porto Alegre – RS, abriga uma grande quantidade de indústrias, com destaque para o ramo dos couros e calçados, e que geram resíduos considerados perigosos. A principal unidade de tratamento, para onde destina-se grande parte dos resíduos gerados, é objeto do presente estudo, e está localizada na região sudoeste do município de Estância Velha, RS. Este empreendimento trata principalmente os resíduos das indústrias de couro, peles e calçados, mas também recebe resíduos de outros ramos. Um levantamento de dados já existentes da área revelou a presença de íons considerados contaminantes como cromo, cloreto e nitrogênio amoniacal presentes no resíduo do aterro. Considerando os riscos que uma eventual contaminação por estes elementos pode oferecer, realizou-se um novo estudo no local, avaliando a contaminação do solo e das águas subterrâneas na área, reconhecendo sua extensão e avaliação em relação a legislação ambiental. A vulnerabilidade do aquífero freático também foi avaliada, com a confecção de mapas conforme os métodos DRASTIC e GOD. A contaminação foi avaliada com base em análises físico-químicas realizadas em 2017, coletadas nos poços de monitoramento instalados na área. Foi reconhecida uma contaminação de fraca intensidade nos solos e nas águas subterrâneas, sendo que os principais elementos contaminantes do solo são arsênio, bário, chumbo, cianeto, cloreto, cobre, cromo, nitrogênio amoniacal e zinco, e nas águas subterrâneas são bário, cromo, ferro, mercúrio, sódio, cloreto, nitrato e sulfato. Não há restrição de uso para os solos da área em relação a legislação ambiental, entretanto, as águas subterrâneas estão comprometidas para uso por alguns parâmetros. A vulnerabilidade do aquífero varia de alta a extrema de acordo com a metodologia GOD, e de média a alta através da aplicação do método DRASTIC.

Palavras-Chave: resíduos sólidos, solos, aquíferos, águas subterrâneas, aterros de resíduos industriais, vulnerabilidade, DRASTIC, GOD, contaminação.

ABSTRACT

The concentration of industrial activity in strategical fields requires the existence of appropriated places to discard the solid waste coming from this sector. Today, the destiny of industrial waste needs a lot of care, because its improper disposal can cause environmental issues, like soil and groundwater contamination, limiting their possible usages. The Vale do Rio dos Sinos region, which belongs to metropolitan region of Porto Alegre, Rio Grande do Sul, contains many industries, especially those that produce leather and shoes, which generates dangerous waste. The main landfill where the waste is destined is the subject of this study, situated at the southwest of Estância Velha city, at Rio Grande do Sul. This landfill treats specially the waste from leather and shoes industries, but it also receives waste from other types of industries. An analysis of the existent data about the landfill points the presence of potential contaminants, like chrome, ammoniacal nitrogen and chloride in the landfill residue. Considering the risks that an eventual contamination by these elements can cause, it was developed a new study at the landfill, evaluating the contamination of soil and groundwater at the area, recognizing its extension and quality in accord to the legislation. The vulnerability of the aquifer was also evaluated, making and combining maps according to DRASTIC and GOD methods. The contamination was evaluated based on physical and chemical analysis from year 2017, collected in the monitoring wells at the area. Low intensity contamination was recognized in soil and groundwater, and the main elements contaminants in the soil are arsenic, barium, lead, cyanide, chloride, copper, chrome, ammonia nitrogen and zinc, and in groundwater are barium, chrome, iron, mercury, sodium, chloride, nitrate and sulfate. There is no restriction for soil usages according to the environmental legislation, but groundwater has its usages limited in some parameters. The aquifer vulnerability varies from high to extreme according to GOD method, and varies from medium to high according to DRASTIC.

Keywords: solid waste, soils, aquifer, groundwater, industrial waste landfills, vulnerability, DRASTIC, GOD, contamination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização da área do estudo no município de Estância Velha, na Região Metropolitana de Porto Alegre, RS. Modificado de: Augustin Jr e Viero (2012).	18
Figura 2. Mapa geológico local da área de estudo, sem a área de ampliação. Extraído de: Augustin Jr (2011).	24
Figura 3. Piezometria da área de estudo, mostrando o fluxo preferencial das águas subterrâneas em direção aos arroios adjacentes ao empreendimento. Os poços de monitoramento estão nomeados como “PZ” na figura por opção do autor, porém, são os mesmos pontos nomeados como “PM” neste estudo. Extraído de: Augustin Jr (2011).	25
Figura 4. Situação atual da área do empreendimento, com destaque para a área de ampliação, em processo de licenciamento.	26
Figura 5. Esquema de divisão da área do empreendimento em quadrantes. Os quadrantes 01 e 02 representam a área atual de operação do aterro, os quadrantes 03 e 04, a de remediação. O quadrante 05 representa a área de ampliação, ainda em licenciamento. Adaptado de: Geoprospec (2017).	27
Figura 6. Disposição dos poços de monitoramento em relação a seus quadrantes em imagem de satélite, demonstrando também a atual situação do empreendimento e sua antropização. Fonte: Google Earth (2018).	28
Figura 7. Unidades de tratamento de resíduos sólidos industriais no Rio Grande do Sul. Fonte: Fepam e Engebio (2014).	31
Figura 8. Unidades de disposição final de resíduos sólidos industriais no Rio Grande do Sul. Fonte: Fepam e Engebio (2014).	32
Figura 9. Percolação de contaminantes em aterros de resíduos que se associam a deficiências na impermeabilização das valas (CEQ <i>apud</i> Guswa <i>et al.</i> , 1984) e (ROCCA <i>et al. apud</i> AUGUSTIN JR, 2011).	35
Figura 10. Fluxograma apontando as etapas do método granulométrico.	40

Figura 11. Desenho esquemático do processo de DRX, quando a lei de Bragg é atendida e os planos cristalinos são identificados, estando representados no difratograma. Fonte: Hinrichs (2014).....	42
Figura 12. Fluxograma explicativo da metodologia GOD e correlações de cada parâmetro. Fonte: Foster e Hirata (2002).....	46
Figura 13. Parâmetros do método DRASTIC e pesos relativos. Fonte: Guiguer e Kohnke (2002).....	48
Figura 14. Fotografia da etapa de campo da área de ampliação, mostrando a descaracterização original da topografia e conseqüente remoção da vegetação, expondo as rochas alteradas correspondentes à geologia local.....	53
Figura 15. Litologia aflorante na área de ampliação do empreendimento (A), com detalhe para a laminação plano-paralela (B).....	53
Figura 16. Unidades geológicas presentes na área de estudo. Modificado de: Augustin Jr (2011).....	54
Figura 17. Localização da amostra UT-04 enviada para laminação.....	55
Figura 18. Fotomicrografia da amostra UT-04 a nicóis descruzados, mostrando a geração de porosidade secundária pela dissolução de grãos, sinalizado pela seta vermelha.....	56
Figura 19. Fotomicrografia da amostra UT-04 a nicóis descruzados, mostrando a porosidade primária e secundária, gerada pela dissolução de grãos (apontadas pela seta vermelha).....	57
Figura 20. Fotomicrografia da amostra UT-04 a nicóis descruzados, mostrando a diferença do tamanho de grãos nas laminação da amostra. Também é possível observar a obstrução parcial da porosidade primária por argilas, destacadas em vermelho.....	57
Figura 21. Localização das amostras coletadas para análise granulométrica, mineralógica e difração de raios x e seu contexto geológico.	58
Figura 22. Frações de areia e finos nas amostras UT-02 e UT-03. As amostras foram coletadas no contexto dos Sedimentos Cenozoicos.	59
Figura 23. Frações de areia e finos nas amostras UT-06 e UT-05, inseridas no contexto geológico da Formação Sanga do Cabral.....	60
Figura 24. Localização dos poços de monitoramento, em imagem de satélite, perto dos quais são realizadas as coletas de amostras de solo para análise. Fonte: Google Earth.	62

Figura 25. Gráficos de correlação entre os elementos Cr e Pb (A); Cu e Pb (B); Ba e Pb (C); Cr e Cu (D); Ba e Zn (E); Ba e Mn (F), considerando os teores em mg.kg⁻¹ das amostragens realizadas em abril e outubro de 2017. Nota-se um aumento significativo de Cr, Cu, e Zn nas análises realizadas no período de outubro.68

Figura 26. Gráfico representando a precipitação mensal medida ao longo do ano de 2017 em comparação com as médias calculadas entre 1990 e 2017. Observa-se que com exceção dos meses de fevereiro, julho e agosto, o regime de chuvas foi superior as médias mensais.....71

Figura 27. Pontos com contaminação de arsênio (A) e bário (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por arsênio é registrada em 11 amostras, e por bário, em 04. Modificado de: Augustin Jr (2011).72

Figura 28. Pontos com contaminação de chumbo (A) e cianeto (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por chumbo foi registrada em apenas uma amostra no primeiro período de análise, reduzindo para os valores do *background* na segunda coleta. O cianeto é registrado a baixas concentrações em todos os pontos de coleta. Modificado de: Augustin Jr, 2011.73

Figura 29. Pontos com contaminação de cloreto (A) e cobre (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por cloreto foi registrada em nove amostras. O cobre aumentou em basicamente todos pontos da segunda coleta, apresentando contaminação em 17 das 18 amostras. Modificado de: Augustin Jr, 2011.....74

Figura 30. Pontos com contaminação de cromo (A) e nitrogênio amoniacal (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por cromo foi registrada em 07 amostras, e o nitrogênio amoniacal ocorre em 14. Modificado de: Augustin Jr, 2011.75

Figura 31. Pontos com contaminação zinco nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação de zinco foi registrada em todas as amostras coletadas em outubro, de forma que este parâmetro obteve um aumento significativo em relação aos valores obtidos para as coletas de abril. Modificado de: Augustin Jr, 2011.....76

Figura 32. Histograma das amostras de alumínio total para as quatro campanhas de amostragem.81

Figura 33. Histograma das concentrações de alumínio dissolvido, considerando as seis campanhas de amostragem.	82
Figura 34. Histograma com as concentrações e classes de arsênio total, indicando que mais de 60% das amostras concentram-se na primeira classe.	84
Figura 35. Histograma com as concentrações de bário total, com mais da metade das amostras concentradas nas primeiras classes, que representam concentrações de 0 a 0,2 mg/L e 0,2 a 0,4 mg/L.	85
Figura 36. Histograma com as concentrações de bário dissolvido considerando as seis campanhas de amostragem.	87
Figura 37. Especificação do bário para a faixa de valores de Eh e pH. Considerando os valores medidos em campo, observa-se que o bário ocorre principalmente na forma dissolvida como Ba^{2+} , o que explica suas concentrações similares nas alíquotas total e dissolvida. Fonte: Takeno (2005).	88
Figura 38. Histograma com as concentrações de chumbo total, considerando os quatro períodos de coleta.	89
Figura 39. Concentrações de chumbo dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05, considerando os seis meses de amostragem.	90
Figura 40. Histograma com a distribuição das concentrações de cromo total para as amostras analisadas nos quatro períodos de coleta.	92
Figura 41. Histograma das concentrações de cromo dissolvido para todos os quadrantes, ao longo de todo período de amostragem.	94
Figura 42. Histograma contendo as concentrações de ferro dissolvido na área dos quadrantes 03, 04 e 05, para os seis meses de monitoramento.	96
Figura 43. Especificação do ferro para a faixa de valores de Eh e pH. Considerando os valores medidos em campo, observa-se que o ferro ocorre na forma de Fe_2O_3 e também como Fe^{2+} o que justifica sua ocorrência em altas concentrações na alíquota total. Fonte: Takeno (2005).	97
Figura 44. Histograma com as concentrações de sódio dissolvido considerando as amostras dos 06 meses de coleta.	100
Figura 45. Zinco dissolvido nos quadrantes 03 e 04, considerando as amostras dos seis meses de coleta.	103
Figura 46. Zinco dissolvido no quadrante 05, onde não há descarte de resíduos, considerando as amostras dos seis meses de coleta.	104

Figura 47. Histograma com as concentrações de cloreto considerando todos os poços de monitoramento e todos períodos de amostragem.	106
Figura 48. Concentrações de alumínio total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela resolução nº 396 de 2008 (CONAMA).	112
Figura 49. Concentrações de alumínio dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela resolução nº 396 de 2008 (CONAMA). O VMP para irrigação e dessedentação de animais é de 5 mg/L, e não foi plotado no gráfico pelo fato nenhum poço exceder esta concentração.	113
Figura 50. Concentração de arsênio total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.	114
Figura 51. Concentrações de arsênio dissolvido em relação ao valor máximo permitido para consumo humano em relação à legislação vigente. O parâmetro não excede o valor de 0,01 mg/L do VMP em nenhum poço.	114
Figura 52. Concentrações de bário total em relação aos valores máximos permitidos pela legislação vigente.	115
Figura 53. Concentrações de bário dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.	116
Figura 54. Concentrações de chumbo total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.	117
Figura 55. Concentrações de chumbo dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação vigente.	117
Figura 56. Concentrações de cromo total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação.	118
Figura 57. Concentrações de cromo dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação.	119
Figura 58. Concentrações de ferro total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos segundo legislação vigente.	120
Figura 59. Concentrações de ferro dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação vigente.	120
Figura 60. Concentração de mercúrio total, nos quadrantes 01 e 02, em relação aos valores máximos permitidos segundo legislação vigente.	121
Figura 61. Sódio total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.	122

Figura 62. Concentrações de sódio dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.	122
Figura 63 Concentração de boro total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos conforme legislação vigente.	123
Figura 64. Concentração de antimônio total nos quadrantes 01 e 02 em relação ao valor máximo permitido segundo a legislação vigente.	124
Figura 65. Concentração de cloretos em relação aos valores máximos permitidos pela legislação ambiental vigente.	125
Figura 66. Concentração de manganês total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos segundo a legislação vigente. Os valores do eixo vertical foram reduzidos a fim de visualizar melhor as linhas de cada valor máximo permitido.	126
Figura 67. Concentração de nitrato nos poços de monitoramento em relação aos valores máximos permitidos conforme legislação.	127
Figura 68. Concentração de níquel nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação.	127
Figura 69. Concentrações de sólidos totais dissolvidos em relação ao valor máximo permitido estabelecido pela legislação.	128
Figura 70. Mapa do parâmetro “G” da área de estudo. O mapa apresenta a mesma cor e o mesmo peso do parâmetro em toda sua extensão, pois o aquífero analisado é o freático em toda a área de estudo, portanto, não confinado.	130
Figura 71. Mapa resultante da classificação dos valores para o parâmetro “O”. A região amarela é representada pelos siltitos da Formação Sanga do Cabral, e a laranja, pelos arenitos. A área em vermelho, que recebeu o maior peso para o parâmetro, compreende os Sedimentos Cenozoicos.	131
Figura 72. Mapa do parâmetro “D”, resultante da interpolação dos níveis estáticos. É possível observar que os menores pesos, correspondentes aos níveis estáticos mais profundos correspondem ao contexto geológico dos siltitos da Formação Sanga do Cabral, de menor permeabilidade.	133
Figura 73. Vulnerabilidade do aquífero freático na área pelo método GOD, variando de alta a extrema.	134
Figura 74. Parâmetro “D” da metodologia DRASTIC, que avalia a profundidade do nível estático na área de estudo.	135

Figura 75. Dados de precipitação total e útil, deflúvio e evapotranspiração obtidos para a realização do balanço hídrico da unidade Sedimentos Cenozoicos.	136
Figura 76. Dados de precipitação total e útil, deflúvio e evapotranspiração obtidos para a realização do balanço hídrico do siltito – Formação Sanga do Cabral.	137
Figura 77. Dados de precipitação total e útil, deflúvio e evapotranspiração obtidos para a realização do balanço hídrico do arenito – Formação Sanga do Cabral.	137
Figura 78. Recarga das águas subterrâneas para cada unidade geológica.	138
Figura 79. Parâmetro “R”, de forma que a recarga ao aquífero é menor para o siltito da Formação Sanga do Cabral e maior para o restante, recebendo pesos 8 e 9, respectivamente.	138
Figura 80. Pesos atribuídos ao parâmetro “A”, que considera a litologia/material do aquífero estudado. O menor valor foi atribuído ao siltito da Formação Sanga do Cabral e o maior, aos Sedimentos Cenozoicos.	139
Figura 81. Mapa do parâmetro S, que considera os solos da área de estudo. Para o siltito da Formação Sanga do Cabral atribuiu-se um valor de 7 pontos, e para o arenito, de 8. Para os Sedimentos Cenozoicos, o valor foi o mais alto, de 9 pontos.	140
Figura 82. Parâmetro “T” do método DRASTIC, considerando 5 classes de declividade onde valores extremos representam áreas mais planas, com maior vulnerabilidade à contaminação.	141
Figura 83. Mapa do parâmetro “I”, representando o peso dos materiais que ocorrem na zona vadosa da área de estudo.	142
Figura 84. Valores de condutividade hidráulica em m/dia obtidos através de slug test para os poços de monitoramento. Fonte: Geoprospec (2012).	143
Figura 85. Mapa do parâmetro “C” representando os valores de condutividade hidráulica da área de estudo, que receberam peso mínimo.	143
Figura 86. Mapa final de vulnerabilidade do aquífero local, produto da combinação dos sete parâmetros do método DRASTIC. O resultado indica que a área apresenta vulnerabilidade moderada a alta.	144
Figura 87. Comparativo do resultado obtido pelos métodos GOD e DRASTIC.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros e seus teores identificados na amostragem do chorume. Fonte: AUGUSTIN (2011).	29
Tabela 2. Distribuição da geração de resíduos sólidos perigosos e não perigosos (ABNT, 2004) nas regiões do estado do Rio Grande do Sul (FEPAM apud AUGUSTIN JR, 2011).	33
Tabela 3. Conteúdo de metais pesados em lodo primário de curtume em mg/kg de matéria seca. (CARRÉ apud KRIEGER, 2000).	33
Tabela 4. Intervalos de escala DRASTIC e sua classificação de vulnerabilidade. Fonte: Aller <i>et al.</i> (1987).	48
Tabela 5. Resultados dos parâmetros analisados em abril de 2017 para as amostras de solos coletadas próximas aos respectivos poços, identificados na primeira coluna. Os resultados estão expressos em mg.kg ⁻¹ . Fonte: Geoprospec. ..	64
Tabela 6. Resultados dos parâmetros analisados em outubro de 2017 para as amostras de solos coletadas próximas aos respectivos poços, identificados na primeira coluna. Os resultados estão expressos em mg.kg ⁻¹	65
Tabela 7. Valores de referência de qualidade (VRQ), prevenção (VP) e investigação (VI), em mg.kg ⁻¹ , para os elementos dos solos da área. Modificado de: FEPAM (2014); CONAMA (2009). Os parâmetros que estão sem os valores na tabela não são estabelecidos pela legislação vigente.	77
Tabela 8. Concentrações de alumínio total em mg/L, nos poços de monitoramento amostrados nas quatro campanhas de coleta ao longo de 2017.	80
Tabela 9. Concentrações de alumínio dissolvido em mg/L nos seis períodos de amostragem em 2017.	81
Tabela 10. Concentrações de arsênio total em mg/L, para os quatro períodos de coleta realizados.	83
Tabela 11. Concentrações de arsênio dissolvido nas águas subterrâneas da área, em mg/L, para as seis campanhas de amostragem.	83
Tabela 12. Concentrações de bário total nos poços de monitoramento amostrados para as quatro campanhas de coleta.	85

Tabela 13. Concentrações de bário dissolvido nos PMs dos quadrantes 03, 04 e 05 para os 06 meses em que ocorreu amostragem.	86
Tabela 14. Concentrações de chumbo total, em mg/L, para os quatro meses de coleta.....	89
Tabela 15. Concentrações de chumbo dissolvido em mg/L nos poços dos quadrantes 03, 04 e 05, considerando seis campanhas de amostragem.	90
Tabela 16. Cromo total em mg/L nos poços de monitoramento amostrados em todos os quadrantes da área.....	91
Tabela 17. Concentrações de cromo dissolvido em mg/L ao longo do período monitorado em 2017.	93
Tabela 18. Concentrações de ferro total para os PMs dos quadrantes 01 e 02, cujas coletas foram realizadas em quatro meses no ano de 2017.....	95
Tabela 19. Concentrações de ferro dissolvido nas amostras coletadas nos PMs correspondentes aos quadrantes 03, 04 e 05, ao longo de seis campanhas de amostragem.	96
Tabela 20. Concentrações de mercúrio total nos poços de monitoramento dos quadrantes 01 e 02 para os quatro períodos de amostragem.....	98
Tabela 21. Concentração de sódio total nos quadrantes 01 e 02 ao longo de 2017, em quatro campanhas de amostragem.....	99
Tabela 22. Concentração de sódio dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 ao longo de seis meses de amostragem.....	100
Tabela 23. Concentrações de zinco total para os quadrantes 01 e 02 ao longo dos quatro meses de amostragem.	102
Tabela 24. Concentrações de zinco dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05, considerando seis períodos de coleta em 2017.	102
Tabela 25. Concentrações de cloreto nos poços de monitoramento de todo o empreendimento e seu respectivo período de análise.	105
Tabela 26. Concentrações de nitrato nos poços de monitoramento de todo o empreendimento e seu respectivo período de análise.	108
Tabela 27. Concentrações de sulfato, em mg/L, para os poços de monitoramento amostrados ao longo do ano nos quadrantes 01, 02, 03, 04 e 05..	109
Tabela 28. Concentração de níquel nos quadrantes 01 e 02 ao longo de quatro meses de amostragem.	110

Tabela 29. Concentração de magnésio total nos quadrantes 01 e 02 ao longo dos períodos de amostragem em 2017.....111

Tabela 30. Poços de monitoramento e seus respectivos níveis estáticos da área do empreendimento.132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CECO – Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DRX – Difração de raios X

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETE – Estação de tratamento de efluentes

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental

IDW – *inverse distance weighted*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

Pdf – powder diffraction file

PM – Poço de monitoramento

SIG – Sistema de informações geográficas

TIN – *triangular irregular network*

VI – Valor de investigação

VMP – Valor máximo permitido

VP – Valor de prevenção

VRQ – Valor de referência de qualidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS E METAS	21
3	JUSTIFICATIVA	22
4	LOCALIZAÇÃO, CONTEXTO GEOLÓGICO, HIDROGEOLÓGICO E INFORMAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO	23
5	REFERENCIAL TEÓRICO	30
5.1	DEFINIÇÃO E CLASSES DE RESÍDUOS	30
5.2	DADOS QUÍMICOS DE EFLUENTES E CONTAMINAÇÃO	32
5.3	AQUÍFEROS E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO.....	35
6	METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO	37
6.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	37
6.2	LEVANTAMENTO DE DADOS EXISTENTES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO	37
6.3	ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITE E FOTOGRAFIAS AÉREAS	37
6.4	ATIVIDADE DE CAMPO	38
6.5	ANÁLISES GRANULOMÉTRICA E MINERALÓGICA DO SOLO	38
6.5.1	Análises Granulométricas	39
6.5.2	Análise Mineralógica	41
6.5.3	Difração de Raios X	41
6.6	ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA	43
6.7	INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA..	43
6.8	DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO	45
6.8.1	GOD	45
6.8.2	DRASTIC	47
6.9	AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	51
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
7.1	DADOS DE CAMPO E ANÁLISES	52
7.1.1	Geologia da Área de Ampliação	52
7.1.2	Análise Petrográfica	54

7.1.3	Análises granulométricas e mineralógicas	58
7.1.4	Difração de Raios X	61
7.2	SOLOS: DADOS QUÍMICOS E AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO.....	61
7.3	QUALIDADE DOS SOLOS EM RELAÇÃO À LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....	77
7.4	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DADOS QUÍMICOS E AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO	79
7.5	QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM RELAÇÃO À LEGISLAÇÃO AMBIENTAL 111	
7.6	VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS	129
7.6.1	Método GOD	129
7.6.2	Método DRASTIC	134
7.6.3	Análise Comparativa: GOD e DRASTIC	145
8	CONCLUSÕES	147
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
	ANEXOS	152

1 INTRODUÇÃO

O Vale do Rio dos Sinos pertence à região metropolitana de Porto Alegre, RS, e é considerado um polo importante da indústria de couros e calçados. Este ramo da indústria local, somada à outras atividades desenvolvidas na área requerem que seus resíduos, produtos dessa atividade, sejam descartados de maneira adequada.

Nessa região há uma série de aterros de resíduos urbanos e industriais, cuja proposta é promover o descarte e tratamento adequado dos resíduos oriundos da indústria local. O aterro de resíduos sólidos industriais estudado por este projeto promove o descarte dos produtos de diferentes ramos da indústria, mas principalmente aqueles advindos do ramo coureiro-calçadista.

O empreendimento está localizado no município de Estância Velha, cuja localização é ilustrada pelo mapa da Figura 1. Suas operações iniciaram-se no ano de 1991 e hoje conta com uma área de 40.86 ha (AUGUSTIN JR e VIERO, 2012), operando com uma capacidade instalada de 439 toneladas por dia para recebimento de resíduos (FEPAM e ENGEBIO, 2014).

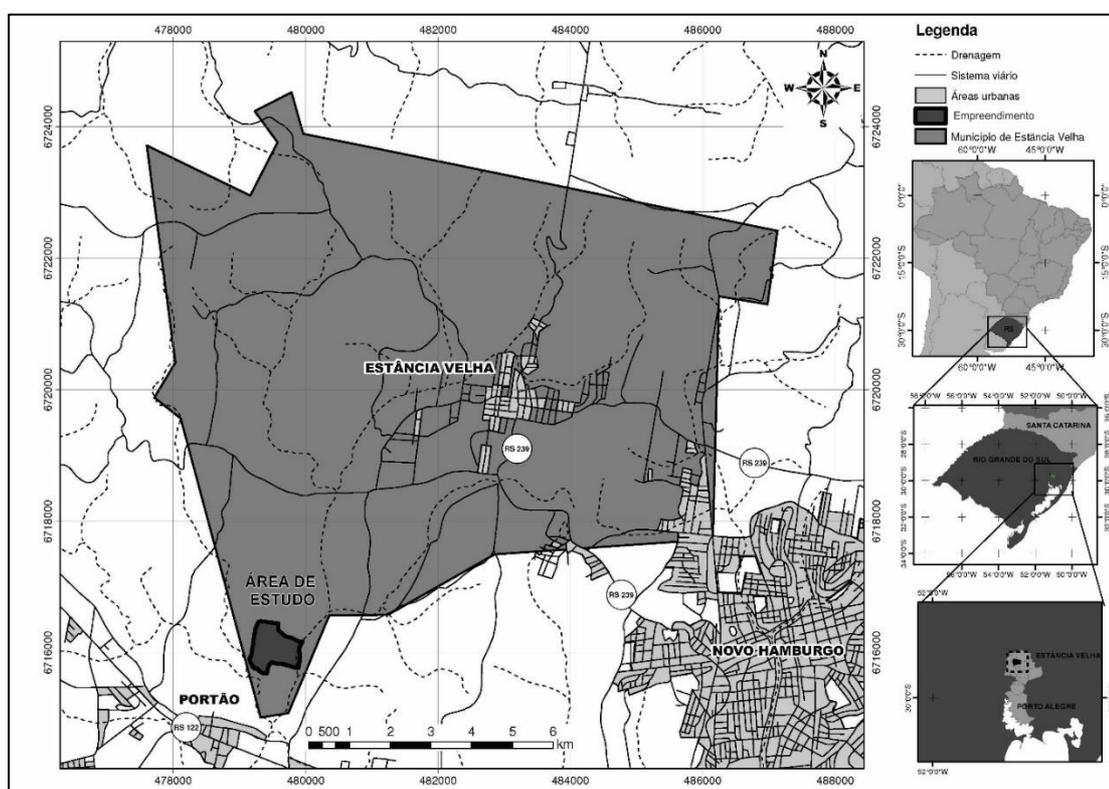


Figura 1. Localização da área do estudo no município de Estância Velha, na Região Metropolitana de Porto Alegre, RS. Modificado de: Augustin Jr e Viero (2012).

A empresa apresentou um crescimento rápido ao longo dos anos de operação (KRIEGER, 2000). Esse tipo de atividade requer um gerenciamento adequado, fiscalização e manutenção constantes, que não acompanharam o ritmo de crescimento da empresa, fazendo com que fosse indiciada por uma série de negligências cometidas no processamento desses resíduos. Íons como cromo, cloreto e nitrogênio amoniacal foram identificados como os principais contaminantes do solo (AUGUSTIN JR e VIERO, 2012). Além disso, cromo, nitrato, sulfato e cloreto foram identificados como os principais contaminantes das águas subterrâneas provenientes das atividades do aterro (KRIEGER, 2000).

As atividades do empreendimento em questão são fundamentais para o descarte de resíduos da indústria local e regional. Os aterros de resíduos apresentam um risco elevado, dada a quantidade de substâncias perigosas que são manejadas e armazenadas no local. Nessa perspectiva, considerando a importância desse tipo de atividade e sua localização, inserida na Região Metropolitana de Porto Alegre, uma eventual contaminação do solo, cursos hídricos locais e águas subterrâneas pode comprometer o uso dos mesmos e também a saúde humana, além dos impactos ao meio físico.

Estudos de diagnóstico ambiental já foram realizados anteriormente na área e como as atividades da empresa ainda estão em funcionamento, o enfoque deste projeto, então, é realizar um estudo complementar no local, verificando se a contaminação é concordante com a já encontrada em anos anteriores, quais suas concentrações, e qual a influência da geologia local nessa distribuição. Para isso, utilizou-se de análises químicas de solo coletadas em diversos pontos na área do empreendimento no ano de 2017, além de análises químicas das águas subterrâneas coletadas nos poços de monitoramento, também ao longo do ano de 2017. A partir da análise e interpretação destas amostras, deve ser verificada a contaminação e os principais elementos presentes, comparando com os valores de referência estabelecidos pelas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – nº 460/2013, nº 420/2009 e nº 396/2008, que dispõem acerca da legislação ambiental para solos e águas subterrâneas. Com o reconhecimento da extensão da contaminação e seu comportamento, foi realizado um diagnóstico da qualidade dos solos e águas, usando a geologia local como base.

Também foi realizado um estudo da probabilidade que contaminantes têm de atingirem o aquífero freático, o que depende de suas propriedades físicas e também de sua susceptibilidade a impactos naturais e antrópicos (GUIGUER e KOHNKE, 2012) que representa a vulnerabilidade à contaminação desse aquífero. A vulnerabilidade foi analisada com base nos métodos GOD (FOSTER e HIRATA, 1988) e DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987).

2 OBJETIVOS E METAS

O objetivo principal do estudo é avaliar a contaminação dos solos e das águas subterrâneas em toda a área do empreendimento, onde se destinam os resíduos industriais de diferentes ramos, reconhecendo sua extensão e intensidade, e comparando os valores das análises realizadas em amostras de solo e água subterrânea com os valores de referência estabelecidos pelo CONAMA. O objetivo também é avaliar a vulnerabilidade do aquífero, utilizando suas propriedades físicas a fim de reconhecer qual o grau de risco de contaminação da área.

As metas a serem desenvolvidas no projeto são as seguintes:

- detalhar a geologia da área e ampliação do empreendimento;
- quantificar a contaminação do solo;
- quantificar a contaminação das águas subterrâneas;
- reconhecer a extensão e possíveis impactos da contaminação;
- avaliar a contaminação dos solos e das águas subterrâneas em relação a legislação ambiental vigente;
- determinar a vulnerabilidade do aquífero local com base em diferentes métodos;

3 JUSTIFICATIVA

O descarte de resíduos sólidos de diferentes naturezas pode representar um problema sério quando realizados de forma inadequada ou sem o manejo necessário. Existem inúmeros casos registrados de aterros de diferentes resíduos que, por negligência em diversos aspectos acabaram por contaminar solos, aquíferos e corpos d'água prejudicando os ecossistemas locais e comprometendo a saúde humana. A realização deste projeto visa compreender de forma mais detalhada a sistemática e o funcionamento do aterro estudado neste projeto.

A importância do estudo se deve à força da indústria local nessa região e à grande demanda pelo descarte dos resíduos provenientes dessa atividade. Assim, reconhecer a contaminação, sua dispersão e a vulnerabilidade do aquífero à contaminação torna-se fundamental para avaliar impactos e riscos à saúde humana, tendo em vista que a área está inserida na Região Metropolitana de Porto Alegre e próxima a regiões povoadas. Dessa forma, a maior gama de informações e o estudo mais detalhado da área pode servir como auxílio para uma ação futura de órgãos ambientais, gerenciamento de recursos hídricos, possíveis planos de remediação em caso de contaminação, avaliações de risco à saúde humana e ainda como base para expansão dos empreendimentos locais ou instalação de novos.

4 LOCALIZAÇÃO, CONTEXTO GEOLÓGICO, HIDROGEOLÓGICO E INFORMAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO

Conforme já mencionado no item 1 - INTRODUÇÃO, a área de estudo está localizada na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, no Vale dos Sinos, município de Estância Velha. Neste item, a Figura 1 expõe a localização da área estudada.

O contexto geológico regional do empreendimento compreende a Bacia do Paraná (BP), de forma que o aterro está situado sob as formações sedimentares da BP. Na área de estudo, a Formação mapeada trata da Formação Sanga do Cabral.

Além das litologias da Formação citada, ocorrem na área sedimentos aluvionares recentes, com espessura máxima de 5 metros. Abaixo destes, ocorrem os sedimentos da Formação Sanga do Cabral, que afloram em regiões mais altas da área e podem atingir 20 metros de espessura (AUGUSTIN JR, 2011). Os arenitos desta Formação apresentam composição quartzo-feldspática, coloração avermelhada e são finos a médios. Em sua estrutura apresentam estratificações cruzadas acanaladas. Na base da sequência ocorre como argilitos ou siltitos, vermelhos e maciços. Os sedimentos cenozoicos são bastante friáveis, de natureza fluvial, compostos por areia fina e média, com quantidades significativas de silte, argila e matéria orgânica (AUGUSTIN JR, 2011).

Diante das informações acerca da geologia local, tem-se a ocorrência de siltitos da Formação Sanga do Cabral na região central do empreendimento, situada em cotas mais elevadas, e arenitos desta mesma Formação ocorrem em toda área de ampliação do empreendimento e que será melhor detalhado nos resultados do trabalho. Por fim, os Sedimentos Cenozoicos estão localizados em cotas mais baixas, e associam-se a sistemas fluviais que delimitam o empreendimento a leste e a sul.

A Figura 2 apresenta o mapa geológico esquemático da área onde está instalado o empreendimento. A figura não contempla a área de ampliação do empreendimento por ainda não estar sendo licenciada no ano de realização do estudo de Augustin Jr (2011). A área de ampliação será utilizada nos estudos deste trabalho e será apresentada nos mapas e figuras ao longo dos resultados do trabalho. Também

é possível observar os dois cursos hídricos que delimitam o empreendimento a sul e a leste.

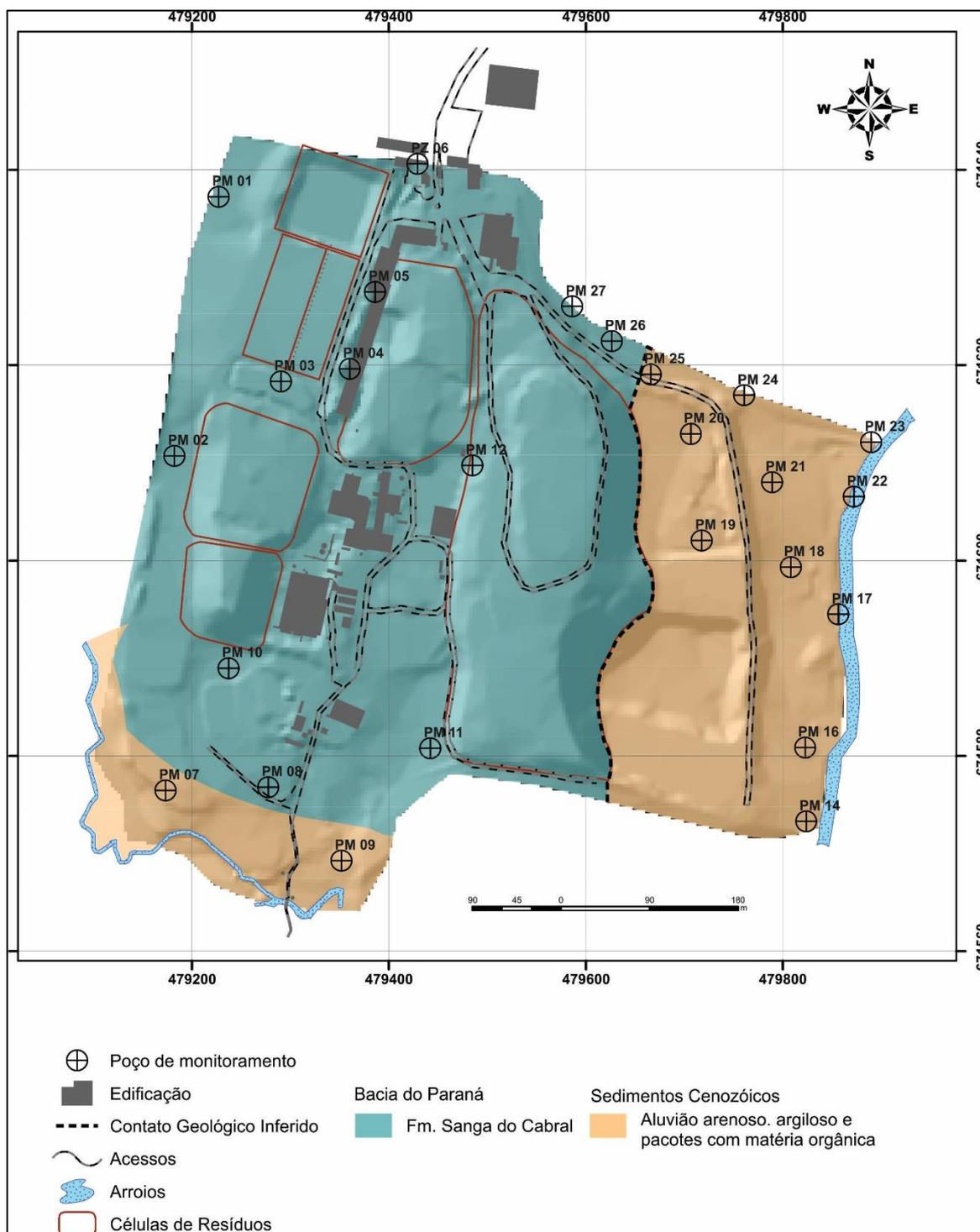


Figura 2. Mapa geológico local da área de estudo, sem a área de ampliação. Extraído de: Augustin Jr (2011).

Os Arroios Casacalho e Portão, que localizam-se a sul e leste do empreendimento, respectivamente, são pontos de descarga das águas subterrâneas.

O mapa piezométrico do empreendimento, confeccionado por Augustin Jr (2011) indica o fluxo preferencial das águas subterrâneas em direção aos arroios, conforme Figura 3. A piezometria foi elaborada sem contemplar a área de ampliação do empreendimento, por não encontrar-se em licenciamento na data do estudo do autor. Esta área trata-se de um ponto branco, onde ainda não há disposição ou influência de resíduos. Portanto, a piezometria abrange a área atual de operação do aterro e a área onde já ocorreu disposição de resíduos, que serão avaliadas quanto à contaminação do solo e águas subterrâneas.

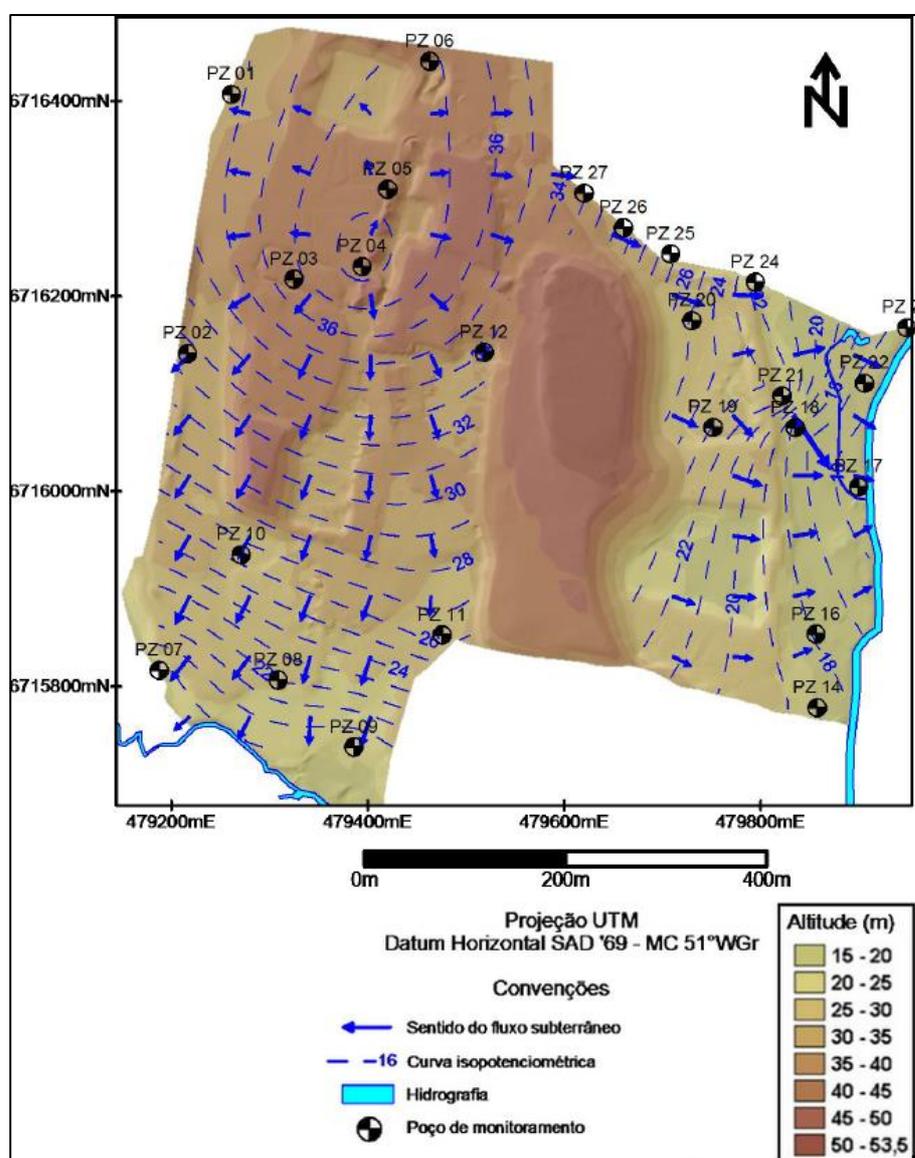


Figura 3. Piezometria da área de estudo, mostrando o fluxo preferencial das águas subterrâneas em direção aos arroios adjacentes ao empreendimento. Os poços de monitoramento estão nomeados como "PZ" na figura por opção do autor, porém, são os mesmos pontos nomeados como "PM" neste estudo. Extraído de: Augustin Jr (2011).

A Figura 4 representa a situação atual da área total do empreendimento, incluindo a área de ampliação, que compreende o ponto branco do empreendimento. A partir desta imagem, é possível visualizar a extensão e localização da área prevista para expansão das atividades do aterro, atualmente em vias de licenciamento.

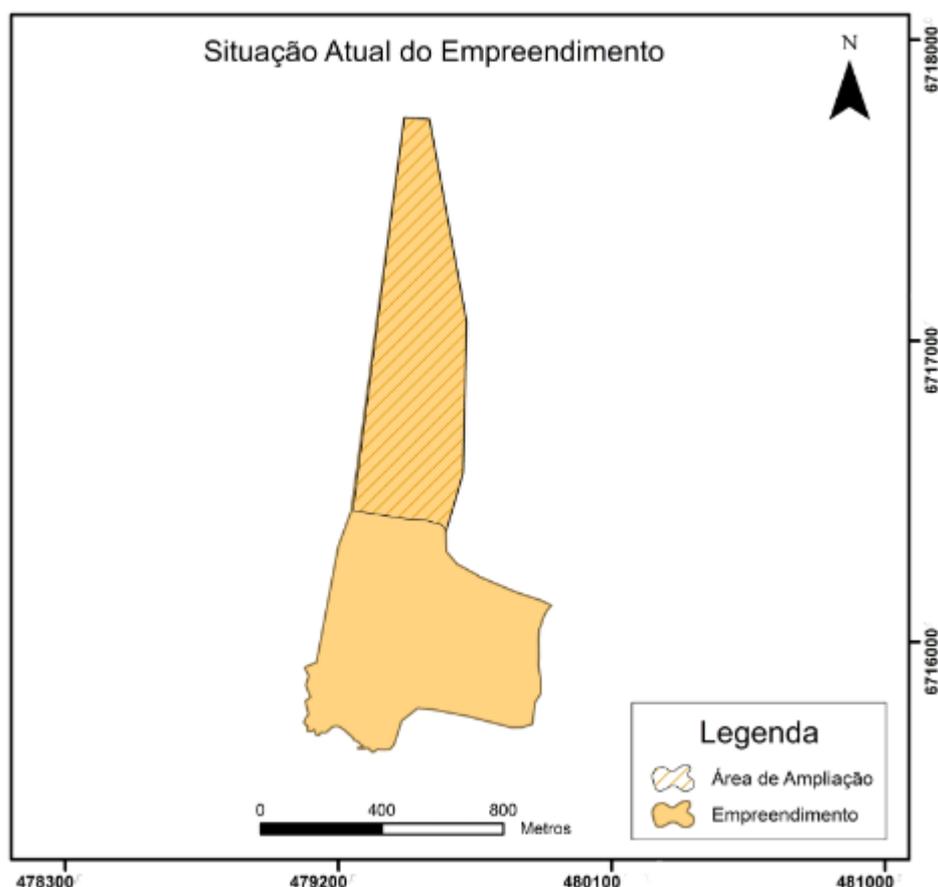


Figura 4. Situação atual da área do empreendimento, com destaque para a área de ampliação, em processo de licenciamento.

O empreendimento é atualmente subdividido em um sistema de cinco “quadrantes” para realização do monitoramento das águas subterrâneas e dos solos. Esta divisão busca incluir os poços de monitoramento em um contexto semelhante de fluxo subterrâneo (conforme mapa piezométrico apresentado) e também enquadrá-los a situação do empreendimento daquele local (GEOPROSPEC, 2017). Por exemplo, os quadrantes 01 e 02 correspondem à atual área de operação do empreendimento, onde estão as células e lagoas ativas. Os quadrantes 03 e 04 correspondem à área de remediação, e o quadrante 05, ao local de ampliação, ainda

em processo de licenciamento, onde não ocorre operação do aterro. A seguir é apresentada uma imagem esquemática (Figura 5) com o contorno e identificação das áreas de cada quadrante. No Quadro 1 também consta a localização de cada poço de monitoramento em relação ao quadrante em que está inserido.

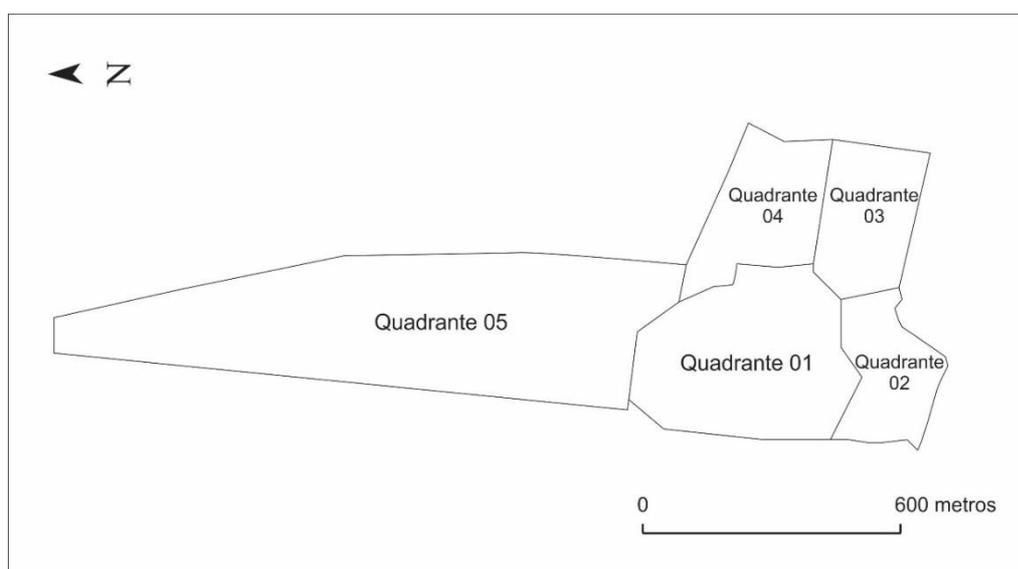


Figura 5. Esquema de divisão da área do empreendimento em quadrantes. Os quadrantes 01 e 02 representam a área atual de operação do aterro, os quadrantes 03 e 04, a de remediação. O quadrante 05 representa a área de ampliação, ainda em licenciamento. Adaptado de: Geoprospec (2017).

Quadro 1. Relação dos poços de monitoramento da área de estudo com seu respectivo quadrante em que está inserido. Fonte: Geoprospec (2017).

Quadrante	Poço de monitoramento
Q 01	01, 02, 03, 05, 06, 12
Q 02	07, 08, 09, 10, 11
Q 03	16
Q 04	18, 19, 21, 24, 25, 26, 26A, 26B, 27
Q 05	28, 29, 30, 32, 34

A disposição dos poços de monitoramento é apresentada em imagem de satélite na Figura 6, em relação a seus respectivos quadrantes. Sendo assim, é possível observar a distribuição dos poços em relação ao contexto do empreendimento e também verificar a situação e antropização da área de estudo.

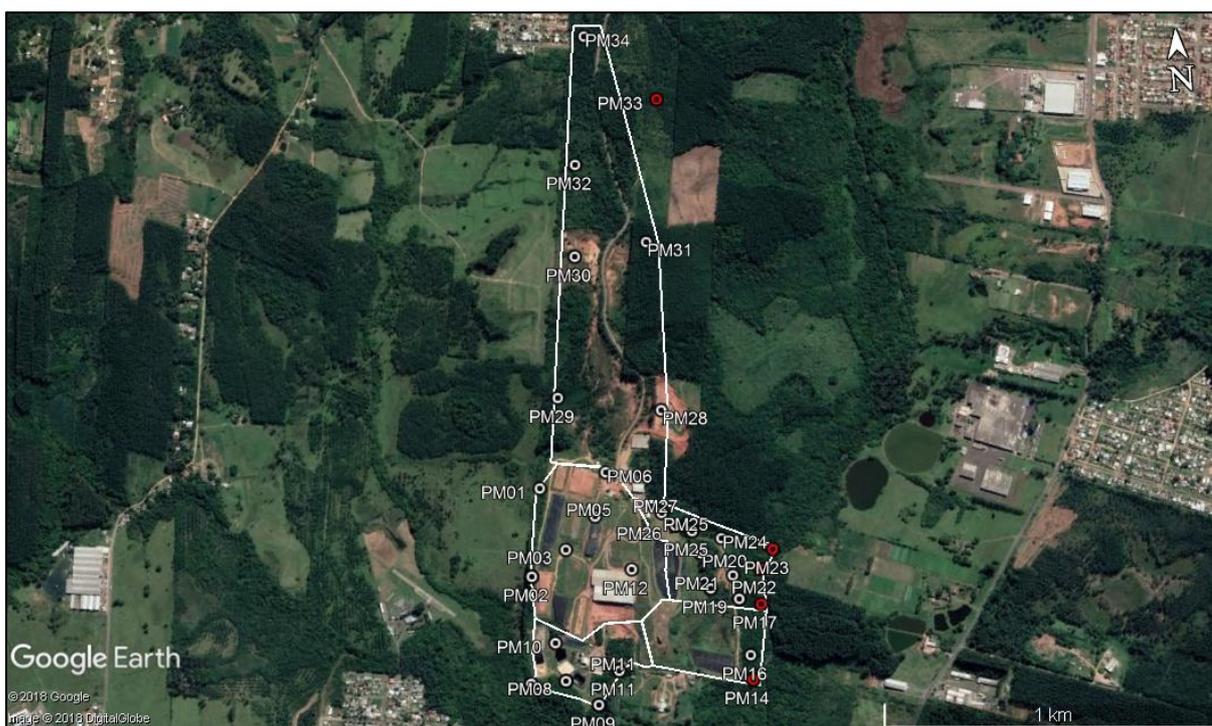


Figura 6. Disposição dos poços de monitoramento em relação a seus quadrantes em imagem de satélite, demonstrando também a atual situação do empreendimento e sua antropização. Fonte: Google Earth (2018).

Conforme já citado, estudos anteriores realizados na mesma área do empreendimento identificaram contaminação do solo (AUGUSTIN JR, 2011) e das águas subterrâneas (AUGUSTIN JR, 2011; KRIEGER, 2000).

Para identificar os principais contaminantes em potencial, amostras do chorume gerado pelos resíduos foram coletadas por Augustin Jr (2011) em quatro pontos, alocados de forma a abranger o entorno das maiores células de disposição de resíduos desta data. As amostras coletadas são nomeadas “PC-4”, “PV-8”, “PV-9” e “PC-10”, sendo que as amostras PV-8 e PV-9 foram misturadas em volumes iguais para gerar uma única amostra. Os resultados obtidos com a análise química realizada pelo laboratório Green Lab indicaram uma série de potenciais contaminantes contidos no resíduo do aterro.

Os dados obtidos indicam que, no chorume, os principais potenciais contaminantes são o cloreto, nitrogênio amoniacal e cromo trivalente. O cromo apresentou concentrações variáveis, sendo que decorre principalmente dos resíduos oriundos da indústria de couros e calçados depositados no aterro.

Outros metais, BTEX e fenóis também foram identificados, mas com concentrações menos elevadas. Fluoreto, molibdênio, níquel, selênio e antimônio não

foram detectados. A Tabela 1 indica os parâmetros identificados na análise química de amostras do chorume por Augustin Jr (2011).

Tabela 1. Parâmetros e seus teores identificados na amostragem do chorume. Fonte: AUGUSTIN (2011).

Parâmetros	Amostra			Limite de detecção
	PC – 4	PC- 8 e 9	PC- 10	
Alumínio (mg/L)	1,58	0,094	0,20	0,001
Arsênio (mg/L)	0,01	n.d.	n.d.	0,0006
Bário (mg/L)	2,32	0,059	0,22	0,001
Cloreto (mg/L)	766	861	4786	5
Cádmio (mg/L)	0,0020	0,0009	n.d.	0,0002
Chumbo (mg/L)	0,0088	0,0058	0,0046	0,0009
Cianeto (mg/L)	0,014	0,022	0,026	0,004
Cobalto (mg/L)	0,021	0,021	0,013	0,001
Cobre (mg/L)	0,034	0,022	0,027	0,0006
Cromo ⁶⁺ (mg/L)	n.d.	n.d.	0,138	0,025
Cromo ³⁺ (mg/L)	0,33	2,55	10,2	0,001
Ferro (mg/L)	3,81	0,52	0,62	0,0008
Manganês (mg/L)	6,47	0,22	0,46	0,0007
Mercúrio (mg/L)	0,055	n.d.	n.d.	0,00005
Sódio (mg/L)	205	260	198	0,004
Sulfato (mg/L)	68,4	n.d.	n.d.	4,00
Benzeno (µg/L)	18,6	n.d.	5,19	2,00
Tolueno (µg/L)	13,4	796	115	2,00
Etilbenzeno (µg/L)	23,2	582	38,6	2,00
Xileno (µg/L)	22,8	287	22,0	2,00
Fenóis Totais (mg/L)	0,493	0,324	27,6	0,003
Nitrogênio amoniacal (mg NH ₃ -N/L)	490	1610	7000	0,003
Nitrogênio total – NH ₃ +N _{orgânico} (mg N/L)	521	1711	7143	0,05
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	13130	2998	13814	2,00

Considerando estes elementos como os contaminantes com maior potencial de ocorrência na área, suas concentrações foram analisadas nas amostras de solo e água coletadas em diferentes períodos do ano de 2017, e serão apresentadas no item 7 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

A gestão dos resíduos sólidos industriais no Estado do Rio Grande do Sul concentra os empreendimentos que promovem o tratamento e descarte destes resíduos em regiões estratégicas, próximas aos locais de concentrações das indústrias.

A seguir, serão definidos os tipos de resíduos tratados pelos aterros de resíduos industriais, além da localização dos principais aterros do estado. Em seguida, serão abordados os principais aspectos químicos dos efluentes líquidos oriundos da indústria de couros e calçados, que representam potenciais contaminantes ao meio físico, dado o risco presente nesses empreendimentos.

Também são apresentadas formas de avaliar a suscetibilidade que os aquíferos possuem à contaminação.

5.1 DEFINIÇÃO E CLASSES DE RESÍDUOS

A norma brasileira (NBR 10.004) define resíduos sólidos como àqueles provenientes do setor industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004). Também engloba lodos e determinados líquidos cujas características não permitam seu descarte em corpos d'água ou redes públicas de esgoto (ROCCA *et al.*, 1993). Os resíduos são divididos, ainda, em urbanos e especiais.

O resíduo pode ser classificado de duas formas: se ele for considerado tóxico, corrosivo, inflamatório ou reativo ele se encaixa em resíduos de classe I ou perigosos (NBR 10.004), e são considerados de classe II caso não sejam perigosos.

A força da indústria de couros e no Rio Grande do Sul, é responsável pela concentração de cerca de 3 mil empresas de calçados (dados de 2006), distribuídas em diversas cidades (GONÇALVES e HAFFNER, 2008), sendo o Vale do Rio dos Sinos uma região onde ocorre a concentração das atividades deste setor. Considerando a migração de algumas indústrias do setor calçadista para outros estados e mesmo para o exterior, é possível que esse número seja menor atualmente. Essa atividade requer descarte apropriado, visto que o setor coureiro é o maior

gerador de resíduos sólidos industriais considerados perigosos, pertencentes à Classe I (ABNT, 2004). Dentre eles, estão líquidos, serragens de couro contendo cromo, óleos, solventes contaminados, tintas, entre outros (AUGUSTIN JR, 2011).

Os resíduos sólidos industriais necessitam tratamento especial, considerando as quantidades de materiais perigosos e os riscos que podem oferecer ao meio ambiente e à saúde humana. (FEPAM e ENGEBIO, 2014). As principais unidades de tratamento de resíduos sólidos industriais do estado do Rio Grande do Sul são apresentadas na Figura 7, enquanto na Figura 8 estão as principais unidades de disposição final deste tipo de resíduo.

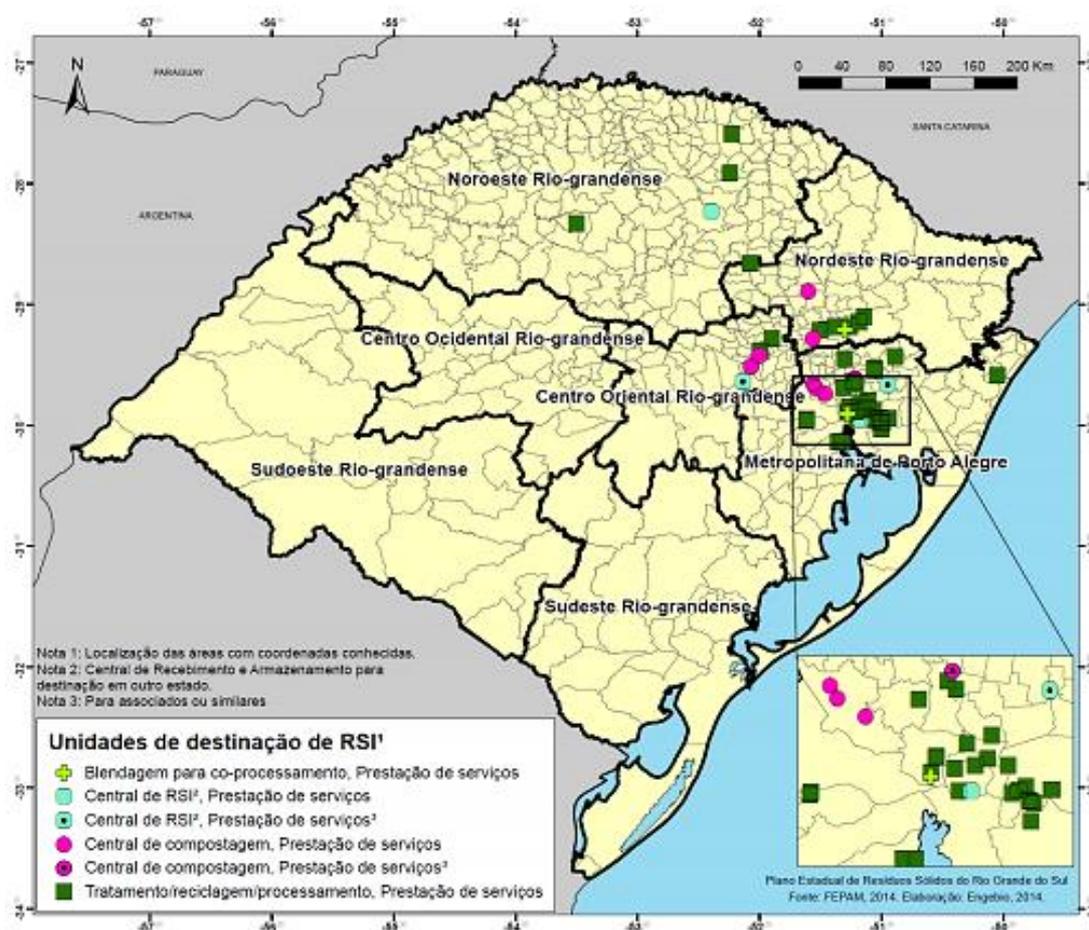


Figura 7. Unidades de tratamento de resíduos sólidos industriais no Rio Grande do Sul. Fonte: Fepam e Engebio (2014).

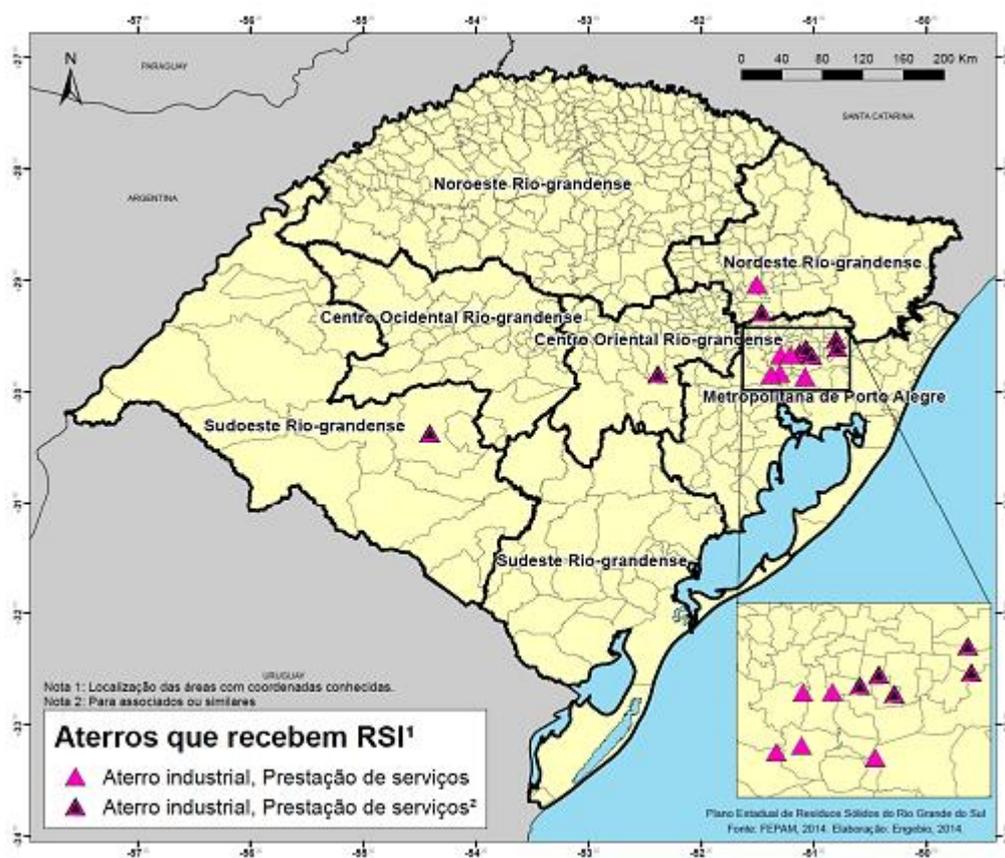


Figura 8. Unidades de disposição final de resíduos sólidos industriais no Rio Grande do Sul. Fonte: Fepam e Engebio (2014).

5.2 DADOS QUÍMICOS DE EFLUENTES E CONTAMINAÇÃO

Os efluentes líquidos das empresas do setor de couros e calçados por muitos anos foram lançados em corpos d'água da região, e os resíduos sólidos lançados diretamente no solo, sem controle algum (KRIEGER, 2000). Com o estabelecimento de novas exigências para o controle desses efluentes, o tratamento adequado dos resíduos visou reduzir os impactos causados por esse setor.

A área de estudo foi a central de tratamento pioneira do estado do Rio Grande do Sul a processar resíduos considerados perigosos, encaixados na Classe I (ABNT, 2004). A proposta inicial era receber apenas os resíduos advindos da produção de couros e calçados, mas ao longo do tempo passou a receber também produtos descartados de outras atividades industriais (KRIEGER, 2000).

A região do Vale dos Sinos é onde ocorre, dentro do estado do Rio Grande do Sul, a maior geração de resíduos sólidos industriais considerados perigosos, encaixados na Classe I (ABNT, 2004), devido à grande concentração de indústrias

coureiro-calçadistas na área (AUGUSTIN JR, 2011). A Tabela 2 representa as regiões do estado do RS que geram as maiores quantidades de resíduos considerados perigosos (ABNT, 2004)

Tabela 2. Distribuição da geração de resíduos sólidos perigosos e não perigosos (ABNT, 2004) nas regiões do estado do Rio Grande do Sul (FEPAM apud AUGUSTIN JR, 2011).

Região do Estado	Geração de Resíduo	
	Classe I (t/ano)	Classe II (t/ano)
Vale do Rio dos Sinos	80.320	315.895
Vale do Taquari	35.121	124.255
Metropolitano Delta do Jacuí	19.520	469.559
Serra	12.583	307.950

Os resíduos oriundos da atividade dos curtumes apresentam elevados índices de cromo, cádmio e outros metais pesados (MORAES *apud* KRIEGER, 2000). Estes resíduos são encaixados na Classe I, perigosos (ABNT, 2004) e geram o chorume quando decompostos. A Tabela 3 representa a concentração de metais pesados gerados em lodo primário de curtumes.

Tabela 3. Conteúdo de metais pesados em lodo primário de curtume em mg/kg de matéria seca. (CARRÉ *apud* KRIEGER, 2000).

Metal	Lodo Primário de curtume (mg/kg de matéria seca)
Cr	16.000 ± 1.000
Fe	18.000 ± 400
Mn	1.000 ± 100
Cu	36 ± 3
Ni	36 ± 3
Zn	182 ± 4
Pb	128 ± 11
Cd	< 0,0033
B	414 ± 20

Estes metais oriundos da atividade dos curtumes apresentam uma série de propriedades geoquímicas distintas, que podem representar contaminantes em

potencial para solos e águas subterrâneas ao interagirem com o meio físico, principalmente através de mecanismos de sorção. Esta, vai depender tanto de parâmetros diversos do meio como das características especiação química do elemento ou íon em questão.

O mecanismo de sorção é a principal maneira pela qual os íons são imobilizados no meio físico, com destaque para os metais. Na área de estudo, os solos apresentam uma quantidade de matéria orgânica significativa, o que favorece a capacidade de retenção dos metais (AUGUSTIN JR, 2011).

Considerando os aterros de resíduos industriais que processam resíduos de curtume, como o empreendimento estudado neste projeto, uma série de elementos presentes no lodo como o cromo, ferro, níquel, (Tabela 3) representam potenciais contaminantes. Outros elementos como alumínio, cloreto, nitrogênio, estão associados aos processos industriais dos curtumes e também estão contidos em resíduos de aterros e podem contaminar os solos e águas subterrâneas.

A contaminação pode ocorrer quando não há uma impermeabilização correta das valas (células) de um aterro de resíduos industriais, de forma que o resíduo infiltra no solo, associado à percolação das águas da superfície, carregando consigo os contaminantes contidos no resíduo. Dessa forma, os fluidos podem atingir o nível freático, contaminando as águas subterrâneas (GUSWA *et al.*, 1984), de acordo com o esquema apresentado na Figura 9. Além disso, o fluxo superficial também pode ser responsável pela contaminação dos solos na zona subsaturada do aquífero freático, sendo este o principal mecanismo de dispersão dos contaminantes reconhecido para a área de estudo (AUGUSTIN JR, 2011), também apresentado de forma esquemática na Figura 9.

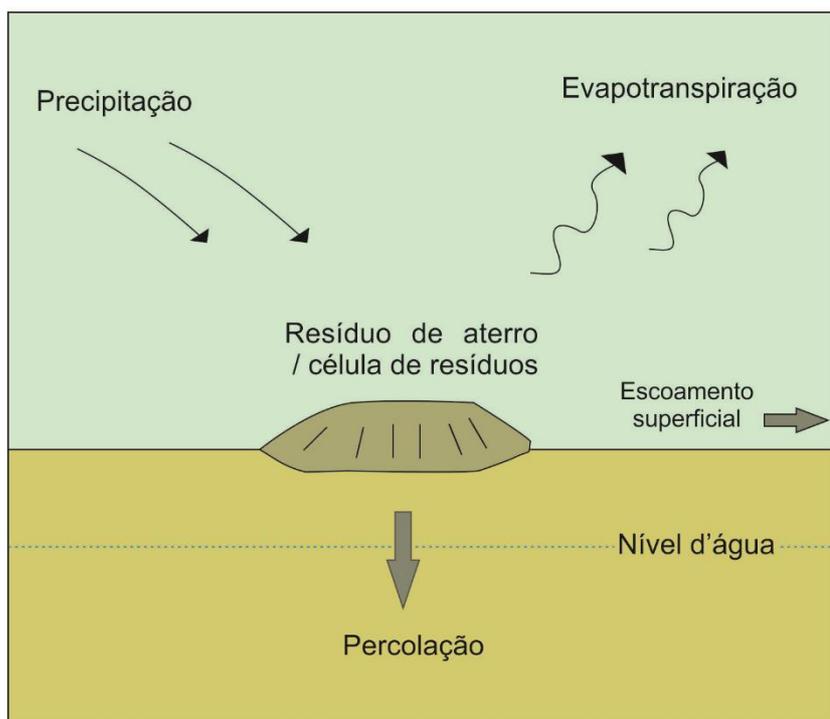


Figura 9. Percolação de contaminantes em aterros de resíduos que se associam a deficiências na impermeabilização das valas (CEQ *apud* Guswa *et al.*, 1984) e (ROCCA *et al. apud* AUGUSTIN JR, 2011).

5.3 AQUÍFEROS E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO

Um aquífero compreende uma formação geológica capaz de armazenar e transmitir água, ou seja, que tenha porosidade e permeabilidade suficientes para isso. Podem ser não confinados, ou livres, quando sujeitos à pressão atmosférica e sua superfície coincide com o lençol freático, ou confinados, quando estão limitados no topo por uma camada confinante (MURCK *et al.*, 1996).

A porosidade de um aquífero sedimentar é determinada pelo tamanho de grão, seleção, forma e fábrica do sedimento original. Processos diagenéticos de compactação e cimentação em geral reduzem a porosidade, enquanto a dissolução mineral aumenta a porosidade dos aquíferos (FETTER, 2001). No caso de aquíferos de natureza ígnea e metamórfica, ou mesmo lutitos de origem sedimentar, a porosidade e permeabilidade decorrem de fraturas, tectônicas ou de contração, em termos de densidade, conectividade, abertura, rugosidade das paredes e preenchimento com minerais secundários. Rochas fraturadas com maior densidade e maior abertura das fraturas, menor rugosidade das paredes e sem preenchimento de

minerais secundários apresentam condutividade hidráulica mais elevada e maiores vazões nos poços.

Os sedimentos cenozoicos e as rochas da Formação Sanga do Cabral compõem dois aquíferos livres, cuja dinâmica do fluxo da água está condicionada pela porosidade, pela permeabilidade e por fraturas locais (AUGUSTIN JR, 2011).

A vulnerabilidade de um sistema aquífero representa a susceptibilidade que este possui de ser contaminado por fontes diversas. Ela baseia-se no fato de que as heterogeneidades entre um aquífero e outro representa um contexto físico diferente; cada parâmetro pode representar uma maior ou menor chance de que alguma substância contaminante introduza o aquífero, variando em graus de proteção. As diferentes características geológicas são consideradas índices, e para estes, atribuem-se valores relativos a fim de quantificar a vulnerabilidade, representando um valor meramente subjetivo, para fins de comparação (GUIGUER e KOHNKE, 2012).

Existem diferentes métodos que podem ser utilizados para se determinar a vulnerabilidade de aquíferos, aplicando-as através de sistemas de informações geográficas, criando sobreposições de mapas de parâmetros. Um dos métodos utilizados é o DRASTIC, que foi desenvolvido pela agência ambiental norte-americana, e considera sete fatores hidrogeológicos. Para cada fator, atribui-se valores que variam de 1 a 10 e pesos pelos quais estes são multiplicados, que pode variar de 1 a 5. Os fatores são: profundidade do nível d'água, recarga do aquífero, litologia do aquífero, tipo de solo, topografia do local, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero (GUIGUER e KOHNKE, 2012). O índice DRASTIC varia de um valor mínimo de 23, e um valor máximo de 230, sendo que quanto maior esse índice, mais vulnerável à contaminação é o aquífero.

Outro método utilizado é o GOD, que foi desenvolvido pela Organização Mundial da Saúde. Ele utiliza a ocorrência do lençol freático, a litologia da zona vadosa e camadas confinantes e a espessura da zona vadosa, atribuindo índices a cada parâmetro. O maior valor possível é 1, que ocorre quando a vulnerabilidade do aquífero é máxima (GUIGUER e KOHNKE, 2012).

6 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

O projeto, desenvolvido em parceria com a empresa Geoprospec, envolveu uma série de etapas, desde o processamento de dados em escritório, com posterior etapa campo e laboratório. Estes procedimentos foram adotados para o atendimento dos objetivos do projeto, e serão detalhados e enquadrados aos objetivos nos subitens seguir.

6.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A primeira fase do projeto consistiu no levantamento da bibliografia já existente, através da análise de trabalhos, dissertações, artigos, dentre outras fontes, que discorram sobre tópicos relacionados ao presente estudo, e também acerca de aspectos gerais, como geologia, hidrogeologia, resíduos sólidos, entre outros.

Apesar de compreender a etapa inicial do projeto, a revisão bibliográfica foi mantida ao longo de toda a execução do projeto, fornecendo suporte para a execução de outras metodologias, interpretação de resultados, discussões, entre outros.

6.2 LEVANTAMENTO DE DADOS EXISTENTES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO

Para a construção do banco de dados do projeto, agrupou-se e sistematizou-se as informações existentes sobre a geologia local, análises físico-químicas de solo e água subterrânea (ano de 2017), poços de monitoramento e seus perfis de construção, sondagens, fotos aéreas, além de informações sobre a hidrogeologia, como condutividade hidráulica e nível estático nos poços.

Esses dados foram obtidos por meio da consulta ao acervo da Geoprospec, que possui diversos laudos e relatórios realizados na área do empreendimento.

6.3 ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITE E FOTOGRAFIAS AÉREAS

A consulta a essas imagens busca uma análise e caracterização prévia do local da área de estudo, antecedendo a etapa de campo, através do reconhecimento das compartimentações internas do empreendimento (área de operação, remediação e ampliação) e checar os limites das unidades geológicas locais mapeadas e o contexto dos poços de monitoramento em relação a estes.

6.4 ATIVIDADE DE CAMPO

A execução da etapa de campo do projeto ocorreu no período de um dia, de forma que foram visitados pontos de interesse em cada unidade geológica, conferindo os limites já mapeados e também identificando as unidades na área de ampliação, que se encontra em etapa de licenciamento.

Também foi realizada a coleta de 04 amostras de solo, através de sondagem com trado helicoidal, e de 02 amostras de rocha, com martelo petrográfico, de forma a amostrar diferentes tipos de solos e litologias das unidades geológicas que afloram no local. Todos os pontos de coleta tiveram suas coordenadas UTM registradas no datum SIRGAS 2000 utilizando GPS Garmin.

6.5 ANÁLISES GRANULOMÉTRICA E MINERALÓGICA DO SOLO

Após a etapa de campo, as amostras de solo coletadas foram processadas em laboratório para obter informações acerca de sua granulometria e mineralogia. Dessa forma, realizou-se no laboratório de sedimentologia da UFRGS o processamento de 04 amostras, utilizando os métodos da análise granulométrica e da análise mineralógica, em lupa.

Frações dessas mesmas 04 amostras foram processadas no laboratório de difração de raios X da UFRGS. Nos itens a seguir, o processo de cada método será descrito.

6.5.1 Análises Granulométricas

O método da análise granulométrica consiste na análise da distribuição dos diferentes tamanhos de partículas existentes em uma amostra. O método é baseado na velocidade de queda das partículas componentes do solo (EMBRAPA, 1997). Para este estudo, as amostras em questão são as amostras de solo, conforme já citado nas metodologias.

O procedimento inicia com a identificação das amostras e sua secagem na estufa a 60°C. Depois de retiradas, já secas, realiza-se sua desagregação com almofariz e pistilo. O solo desagregado é adicionado a um béquer junto a água destilada, registrando a amostra correspondente e pesando na balança; pesa-se o copo vazio e o copo com a amostra.

A próxima etapa envolve a agitação da amostra no béquer, passando o conteúdo para uma peneira de 250 *mesh*. Abaixo desta, há um funil com objetivo de direcionar o conteúdo que passar pela peneira a uma proveta. Aos poucos adiciona-se água destilada ao sedimento, completando 1000ml na proveta, de forma que toda a fração fina fique concentrada nesta, e somente a fração grossa não passe na peneira. A fração grossa retida é enviada à estufa em temperatura de 60°C.

A amostra em suspensão da proveta é analisada conforme os princípios da Lei de Stokes, pelo método da pipetagem, com uso de defloculante. A suspensão é agitada durante alguns segundos, de forma que se contam 02 horas e 03 minutos após o fim da agitação, que é o tempo necessário para que o silte assente e que uma percentagem conhecida das argilas esteja concentrada nos primeiros 100ml da solução, que é a fração pipetada.

A suspensão é coletada, sendo transferida em seguida para um béquer, sempre numerando a amostra e pesando o recipiente. O material é enviado para a estufa até que a suspensão evapore. O material é pesado, determinando assim, o peso das argilas que estavam concentradas naquela fração. Posteriormente, no tratamento estatístico dos dados, as argilas são multiplicadas por um fator para que se obtenha sua fração total.

O material grosso que ficou na estufa é pesado após sua secagem, de forma que cada fração agora é determinada pelo método do peneiramento. As frações de areia passam por peneiras com diferentes aberturas que correspondem ao tamanho

de grão de cada fração. As aberturas utilizadas para o material em questão foram: 1mm, 0,50mm, 0,25mm, 0,125mm e 0,062mm, que correspondem ao intervalo de areia muito grossa a areia muito fina.

Assim, o material que passa pelas peneiras é pesado, determinando a quantidade em gramas de cada fração. Ao final, tem-se o peso em gramas dos grossos e da argila, bem como o peso total da amostra. É possível então, realizar uma subtração para saber quantas gramas existem de silte.

Com esses dados é possível, por fim, calcular a porcentagem de cada fração de grossos e finos. Estes cálculos foram realizados no laboratório de sedimentologia do CECO (Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – UFRGS) utilizando o programa Panicom.

A precisão desta técnica depende da representatividade da amostra e do cuidado no laboratório para que não ocorra perda de material, dependendo, portanto, do cuidado e atenção na execução das atividades. A Figura 10 representa de forma esquemática as etapas utilizadas no desenvolvimento desta técnica.

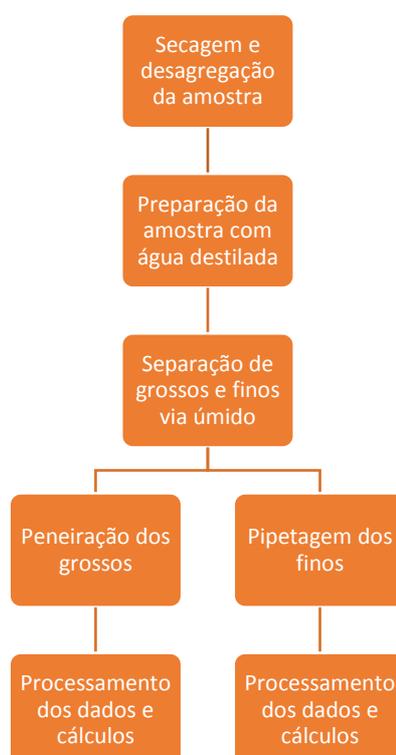


Figura 10. Fluxograma apontando as etapas do método granulométrico.

6.5.2 Análise Mineralógica

A análise mineralógica utiliza apenas os minerais da fração grossa, obtidos com o desenvolvimento do método da análise granulométrica descrita acima.

O processo de análise mineralógica consiste em coletar uma fração representativa da amostra e adicioná-la ao campo de visão de uma lupa. A partir daí a quantidade de grãos é contada e sua identificação é realizada, calculando a porcentagem de cada fração. A precisão do resultado depende da representatividade da amostra, dependendo da etapa anterior, conforme mencionado.

Nessa análise também podem ser observados aspectos morfooscópicos dos minerais, como o arredondamento, esfericidade e polimento.

6.5.3 Difração de Raios X

A difração de raios X (DRX) é uma técnica analítica que permite analisar fases minerais. Ela identifica planos cristalinos através de um conjunto de picos com os quais podem ser calculadas as distâncias interplanares do cristal (HINRICHS, 2014).

O conjunto dessas distâncias está catalogado em um banco de dados chamado *pdf* (*powder diffraction file*), que identifica a semelhança de fases minerais, permitindo a interpretação dos difratogramas resultantes da análise com base nestes valores conhecidos.

O método consiste na iluminação das amostras com um feixe de raios X monocromáticos, que se movimentam em ângulos distintos (θ). Os planos cristalográficos que estiverem paralelos à superfície serão reconhecidos pelo detector e aparecerão no resultado (difratograma). O detector é posicionado em um ângulo θ em relação a superfície da amostra e em um ângulo 2θ em relação ao feixe de raios X.

A técnica da difração de raios X é regida pela Lei de Bragg, expressa pela equação abaixo:

$$n.\lambda = 2.d.\text{sen } \theta$$

Na equação, “d” significa a distância entre os planos cristalinos, enquanto λ é o comprimento de onda dos raios X; “n” representa a ordem de difração, e por fim, o ângulo θ é o ângulo de incidência dos raios.

Para que ocorra a difração, os raios precisam estar em fase, seguindo a Lei de Bragg. Sempre que se verifica esta condição, aparece um pico no difratograma.

A Figura 11 ilustra um plano cristalino que se encontra paralelo à superfície e cujos raios incidentes apresentam-se em fase, satisfazendo a referida lei e com seus picos aparecendo no difratograma ao lado.

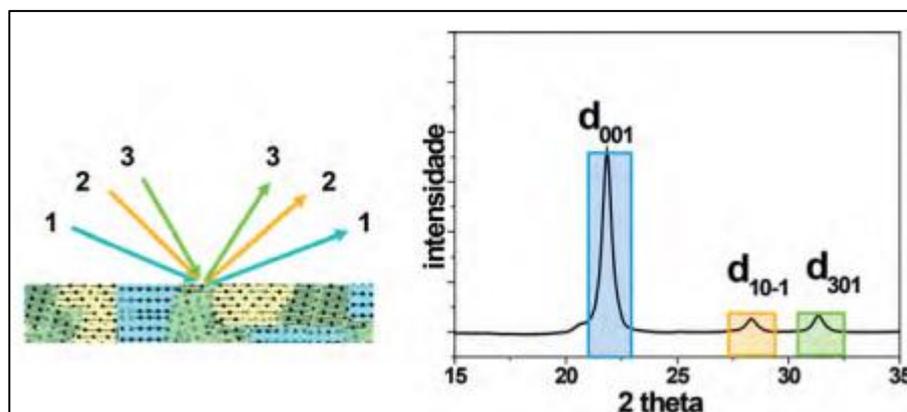


Figura 11. Desenho esquemático do processo de DRX, quando a lei de Bragg é atendida e os planos cristalinos são identificados, estando representados no difratograma. Fonte: Hinrichs (2014).

O laboratório de DRX do Instituto de Geociências da UFRGS conta com um difratograma do tipo θ - 2θ e um software chamado EVA para interpretação dos difratogramas.

A metodologia utilizada para análises do tipo pó ou rocha total consiste na cominuição do material até a fração argila para que a amostra seja analisada no DRX. Neste método ocorre a difração simultânea de todos os planos cristalinos presentes na amostra, de forma a identificar todas as fases presentes, diferentemente do método orientado, onde a amostra é agitada por algumas horas favorecendo a orientação das argilas para identificação das mesmas.

Na leitura do difratograma, para que um registro seja considerado um pico ele deve ter a contagem pelo menos 3 vezes maior que a oscilação do *background*. Os limites de detecção para fases com número atômico médio baixo (minerais em geral) são da ordem de 5% e de minérios (Z médio mais alto) e 3%.

6.6 ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

As duas amostras coletadas na etapa de campo, pertencentes à Formação Sanga do Cabral, foram enviadas ao Laboratório de Preparação de Amostras da UFRGS, para laminação. Uma das amostras foi coletada no contexto do siltito desta Formação, e a outra, no arenito. Entretanto, foram confeccionadas somente 2 lâminas delgadas do arenito, pois a amostra do siltito não apresentou condições para laminação.

6.7 INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISES QUÍMICAS DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA

As análises químicas de solo do empreendimento foram analisadas em dois períodos de coleta, em abril e outubro do ano de 2017, comparando os resultados obtidos com os registrados por Augustin Jr (2011). Já as análises químicas das águas subterrâneas foram realizadas ao longo de diversos meses no ano de 2017, cuja periodicidade de coleta é variável conforme o parâmetro analisado e quadrante.

O laboratório responsável pela coleta e processamento das análises é o Laboratório de Análises Químicas *Mérieux NutriSciences*, situado no município de Canoas – RS. Os parâmetros analisados, periodicidade e pontos de coleta, foram determinados com base nas exigências do órgão ambiental estadual.

A periodicidade de coleta das águas subterrâneas no ano de 2017, em cada quadrante, para cada parâmetro, consta no Quadro 2, considerando os principais elementos e parâmetros abordados neste estudo.

Quadro 2. Periodicidade de coleta e análise de cada parâmetro em relação aos quadrantes do empreendimento. Fonte: Geoprospec (2017).

Parâmetro	Quadrante	Fev	Abr	Jun	Ago	Out	Nov	Dez
Alumínio	01 e 02							
Arsênio	01 e 02							
Bário	01 e 02							
Chumbo	01 e 02							
Cromo	01 e 02							
Cromo	03, 04 e 05							
Ferro	01 e 02							
Mercúrio	01 e 02							
Sódio	01 e 02							
Zinco	01 e 02							
Cádmio	01 e 02							
Cromo Hexavalente	01 e 02							
Cromo Hexavalente	03, 04 e 05							
Cianeto	01 e 02							
Cianeto	03, 04 e 05							
Cloreto	01 e 02							
Cloreto	03 e 04							
Cloreto	5							
Cobalto	01 e 02							
Cobre	01 e 02							
Magnésio	01 e 02							
Manganês	01 e 02							
Níquel	01 e 02							
Sulfato	01 e 02							
Sulfato	03, 04 e 05							
Sólidos Totais Dissolvidos	01 e 02							
Sólidos Totais Dissolvidos	03, 04 e 05							
Alumínio D	03, 04 e 05							
Arsênio D	03, 04 e 05							
Bário D	03, 04 e 05							
Chumbo D	03, 04 e 05							
Cromo D	01 e 02							
Cromo D	03 e 04							
Cromo D	5							
Ferro D	03, 04 e 05							
Mercúrio D	03, 04 e 05							
Sódio D	03, 04 e 05							
Zinco D	03, 04 e 05							

Os pontos de coleta de amostras de solo são os mesmos alocados nos estudos do diagnóstico ambiental da área, realizado em 2009/2010 (GEOPROSPEC, 2018). A distribuição dos pontos de coleta foi situada próxima a pontos onde haviam disposições irregulares de resíduos e extravasamentos de contaminantes. Estes pontos, entretanto, não refletem a realidade atual de disposição de resíduos do empreendimento, nem tem relação com a divisão da área em quadrantes, comentada anteriormente no item 4, que foi realizada em época posterior. A localização dos pontos de coleta será apresentada no item 7.2.

Os principais parâmetros analisados foram selecionados com base nos principais potenciais contaminantes identificados nas análises de chorume. Suas concentrações foram classificadas de acordo com os valores estabelecidos pelas resoluções do CONAMA, nº 460/2013, nº 420/2009 e nº 396/2009.

6.8 DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO

A vulnerabilidade do aquífero freático da área foi determinada utilizando os métodos DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) e GOD (FOSTER e HIRATA, 1988); o primeiro, utilizando sete índices com diferentes pesos (profundidade do nível d'água, recarga ao aquífero, litologia do aquífero, tipo de solo, topografia do local, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero) e o segundo três (ocorrência do lençol freático, litologia da zona vadosa e camadas confinantes, profundidade do lençol freático), cujos valores auxiliam a interpretar o quão provável é a ocorrência de contaminação nesse aquífero (GUIGUER e KOHNKE, 2012).

Para o geoprocessamento e confecção dos mapas de cada parâmetro utilizou-se o *software* ArcMap 10.3, e suas funcionalidades. Os mapas também foram editados, após finalizados, no *software* CorelDRAW x8.

6.8.1 GOD

A metodologia GOD foi inicialmente proposta por Foster e Hirata (1988), a fim de realizar estudos acerca da vulnerabilidade natural de aquíferos. O método considera a avaliação de três parâmetros, que são: o tipo de aquífero (G – *groundwater occurrence*), que pode ser confinado ou não; a litologia (O – *overall*

aquifer class), que considera a litologia situada acima da zona saturada do aquífero, que condicionam o tempo de deslocamento e comportamento dos contaminantes, e por fim, o último parâmetro é a profundidade da água no aquífero (D – *depth of water table*) (GUIGUER e KOHNKE, 2012).

O parâmetro G pode admitir valores de 0 a 1, enquanto o parâmetro O pode variar de 0,3 a 1. O nível estático, ou o parâmetro D assume valores entre 0,4 e 1. Estes valores representam uma proposta dentro das variações de cada parâmetro, podendo ser reajustados dependendo da situação ou no caso de não se aplicarem. A Figura 12 representa a proposta de correlação destes valores dentro com as ocorrências de cada parâmetro.

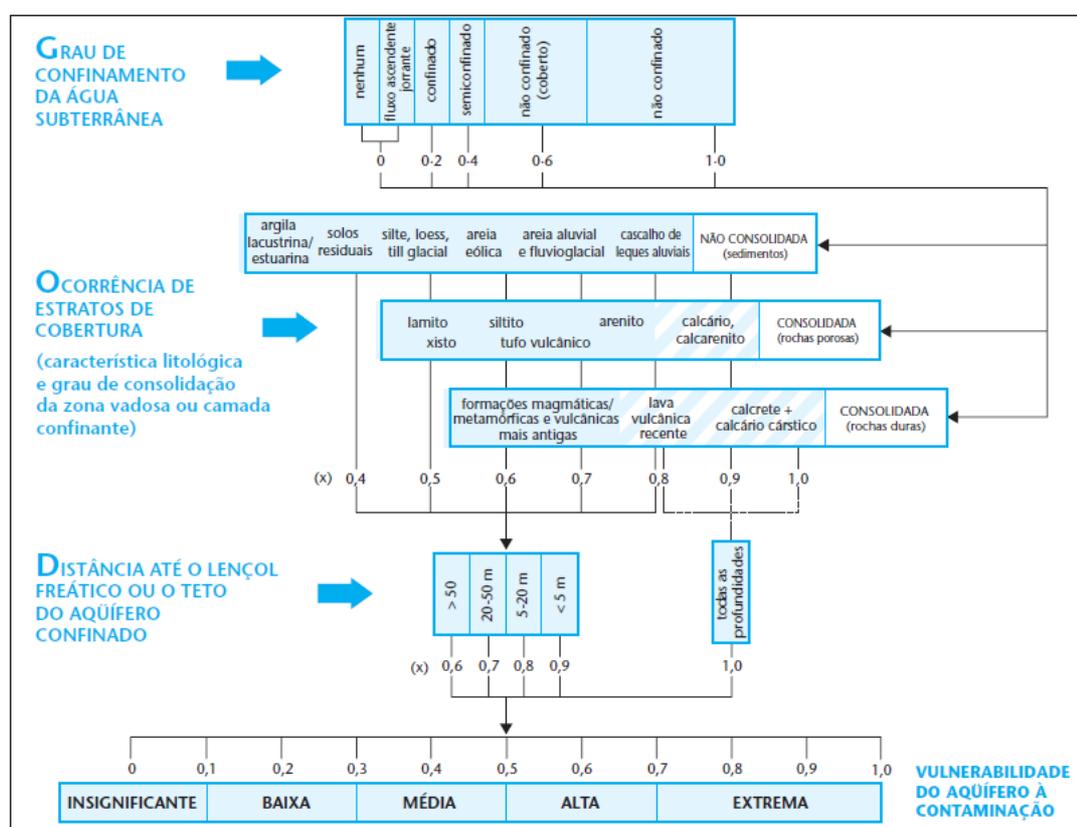


Figura 12. Fluxograma explicativo da metodologia GOD e correlações de cada parâmetro. Fonte: Foster e Hirata (2002).

Para a elaboração dos mapas dos parâmetros G e O foram utilizadas as informações existentes sobre a área de estudo, além de descrições petrográficas das amostras coletadas na etapa de campo.

Para o parâmetro “ D ” utilizou-se as medidas mais recentes do nível d’água realizadas nos poços de monitoramento da área, consultadas no acervo da Geoprospec.

Ao fim da atribuição dos pesos a cada critério, realiza-se a multiplicação dos parâmetros, de forma que a vulnerabilidade pode ser considerada insignificante quando o resultado variar entre 0 a 0,1; baixa quando variar de 0,1 a 0,3; média quando ocorrer entre 0,3 a 0,5; alta quando for entre 0,5 e 0,7 e extrema quando for superior a 0,7. O maior resultado possível do método é 1.

A aplicação do método foi apoiada em SIG – Sistemas de Informações Geográficas, com a confecção de mapas e multiplicação dos mapas de cada parâmetro no software ArcMap. As funcionalidades utilizadas neste *software* consistiram, basicamente, de ferramentas de conversão das feições para arquivos raster, reclassificação de valores e a ferramenta álgebra de mapas, utilizada para a multiplicação dos mapas.

Os níveis estáticos do parâmetro D foram interpolados através do método IDW – *Inverse Distance Weighted*, do módulo das ferramentas de análise espacial do software ArcMap. A potência utilizada foi 2.

6.8.2 DRASTIC

A proposta do método DRASTIC é semelhante à do método GOD, que consiste na utilização de mapas de diferentes parâmetros influentes na vulnerabilidade do aquífero, através da atribuição de pesos e realização de uma multiplicação entre os critérios.

O DRASTIC, entretanto, apresenta uma análise mais detalhada em relação ao GOD, por considerar um número maior de critérios, sendo que cada um apresenta pesos relativos diferentes. O método foi desenvolvido por uma agência de proteção norte americana, por Aller *et al.* (1987). A Figura 13 representa os sete parâmetros utilizados por esta metodologia

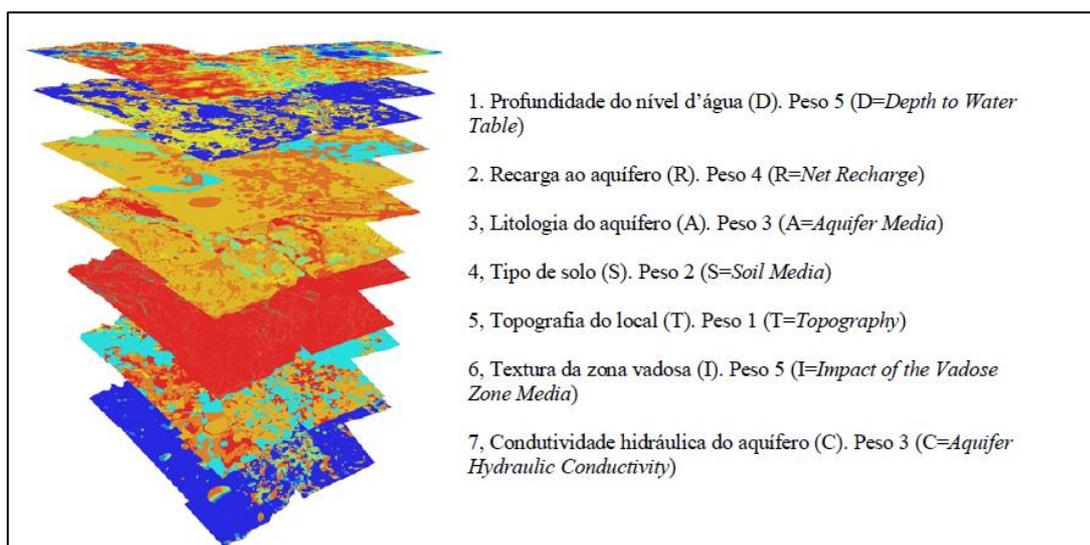


Figura 13. Parâmetros do método DRASTIC e pesos relativos. Fonte: Guiguer e Kohnke (2002).

Cada parâmetro tem seu peso multiplicado pelos valores que receberam de cada variação, e no fim, são combinados para obter o valor final. A escala DRASTIC pode variar de 23 a 230, de forma que a Tabela 4 mostra a subdivisão desses valores desde uma vulnerabilidade baixa até a extrema.

Tabela 4. Intervalos de escala DRASTIC e sua classificação de vulnerabilidade. Fonte: Aller *et al.* (1987).

VULNERABILIDADE			
Baixa	Moderada	Alta	Extrema
23 a 119	120 a 149	150 a 179	180 a 230

As limitações do método requerem que a área analisada tenha no mínimo 40ha (GUIGUER e KOHNKE, 2012). Apesar do método fornecer uma análise de maior detalhe em relação ao método GOD, pode ocorrer uma dificuldade na obtenção de todos os parâmetros quando se tratar de áreas de estudo muito amplas. Entretanto, considerando os estudos prévios já realizados na área e o grande volume de dados secundários já existentes, obtidos pela Geoprospec, tem-se a disponibilidade de todos os parâmetros necessários para a aplicação do método.

O parâmetro “D”, da mesma forma que na metodologia GOD, representa o nível estático da água subterrânea medido nos poços de monitoramento do local. Desta forma, os valores utilizados e o método de interpolação (IDW) mantiveram-se os mesmos em relação ao método anterior. Para a metodologia DRASTIC, este parâmetro possui um peso de valor 5.

Já o parâmetro “R” considera a recarga ao aquífero em questão, com um peso de 4 pontos. Para a definição deste parâmetro utilizou-se um método indireto de estimativa, a partir do balanço hídrico. Este método considera que a água disponível para recarga ao aquífero resulta da diferença dos valores de precipitação, perdas por escoamento superficial e evapotranspiração.

Para o cálculo, foram utilizados dados pluviométricos e temperaturas médias mensais de 27 anos, entre os anos de 1990 e 2017, obtidos do banco de dados do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, estação Porto Alegre, código 83967. Estes dados, quando processados e aplicados a equações, fornecem dados acerca da precipitação total, evapotranspiração e escoamento superficial.

A partir dos dados pluviométricos, calculou-se a média de precipitação mensal, de janeiro à dezembro, a fim de obter a precipitação total.

O mesmo foi realizado para os valores de temperatura. O valor resultante foi aplicado à equação de Thornthwaite (1948) demonstrada abaixo, que utiliza as temperaturas médias mensais para obter a evapotranspiração da área.

$$ET = 16 (10T_m/I)^a$$

Sendo que “ET” representa a evapotranspiração (mm); “T_m” a temperatura média mensal, (°C); “I” o índice térmico anual; e por fim, a constante “a” que depende das condições climáticas locais, calculada a partir do valor de “I”. O Valor do parâmetro “I” pode ser calculado pela equação abaixo.

$$I = \sum_{i=1}^{12} (T_m/5)^{1,514}$$

Realizando a diferença entre a precipitação útil (obtida através da precipitação total e do coeficiente de escoamento superficial) e a evapotranspiração é possível identificar os meses onde há déficit hídrico e também aqueles em que há água disponível para recarga, obtendo assim, o parâmetro “R”.

O terceiro parâmetro, “A”, considera a litologia do aquífero, recebendo um peso de 3 pontos. Com base nos dados existentes sobre a geologia da área, além das

lâminas petrográficas, foi possível estimar os valores deste parâmetro para cada unidade.

O parâmetro “S” considera o tipo de solo do aquífero, e possui peso de 2 pontos. Dessa forma, considerando as análises granulométricas e mineralógicas realizadas, além de dados secundários como perfis de poços de monitoramento, boletins de sondagem, entre outros, foram estimados os pesos para cada tipo de solo.

A topografia do local também é analisada pela metodologia DRASTIC, correspondendo ao parâmetro “T”. As curvas de nível foram obtidas no acervo da empresa Geoprospec, de forma que o espaçamento entre elas é de 1m. Este parâmetro possui peso 1 de relevância para a álgebra dos mapas, de forma que usa diferentes classes de declividade do terreno que podem variar de pesos entre 1 e 10.

Para gerar o mapa de declividade, utilizou-se como primeira ferramenta uma interpolação das curvas por TIN - *Triangular Irregular Network*, “rede irregular de triângulos” em português, disponível no software ArcMap. Este modelo fornece uma espécie de superfície do terreno gerada com base na cota de cada curva de nível. Este modelo foi convertido para imagem do tipo *raster* no mesmo software para atribuir as classes de declividade.

O parâmetro “I” tem um peso de 5 pontos e representa o material da zona vadosa da área estudada. Informações sobre o material da área foram obtidas por meio de dados secundários e também através da coleta de amostras de solo realizadas na etapa de campo, que foram submetidas à análise granulométrica.

Por fim, o último parâmetro (C), com peso 3 de relevância para a álgebra dos mapas considera a condutividade hidráulica do aquífero. Os valores para este parâmetro foram obtidos através dos resultados de *slug test* realizados em 12 dos poços de monitoramento da área de estudo pela empresa Geoprospec. Os valores foram obtidos pela aplicação do método de Hvorslev (1951).

Os parâmetros “D” e “C” foram interpolados através da ferramenta IDW – *Inverse Distance Weighted*, do software ArcMap.

Cada um dos sete mapas apresentado acima foi combinado pela ferramenta “álgebra de mapas” do ArcMap, multiplicada pelo seu peso. Portanto, a “fórmula” aplicada neste módulo foi a seguinte:

$$\text{DRASTIC} = (\text{Parâmetro D} * 5) + (\text{Parâmetro R} * 4) + (\text{Parâmetro A} * 3) + (\text{Parâmetro S} * 2) + (\text{Parâmetro T} * 1) + (\text{Parâmetro I} * 5) + (\text{Parâmetro C} * 3)$$

6.9 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A avaliação ambiental da área foi realizada com base nos resultados obtidos das análises químicas do solo e da água subterrânea. As concentrações de cada parâmetro foram comparadas à estudos anteriores e também à legislação ambiental vigente, considerando as resoluções do CONAMA, nº 460/2013, nº 420/2009 e nº 396/2009. Estas resoluções dispõem acerca de valores de referência para solos e águas subterrâneas considerando diversos usos.

Sendo assim, a comparação com os valores estabelecidos por cada norma permitiu classificar os solos e as águas com base em seus diversos usos possíveis.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aquisição, processamento e interpretação dos dados do trabalho.

7.1 DADOS DE CAMPO E ANÁLISES

Nos subitens a seguir, serão comentados e discutidos os resultados obtidos a partir das coletas realizadas em campo, que incluem as análises granulométricas, mineralógicas, petrográficas e difração de raios X.

7.1.1 Geologia da Área de Ampliação

Durante a etapa de campo, a área de ampliação do empreendimento foi visitada a fim de caracterizar a geologia local.

Nesta área, que corresponde ao quadrante 05 do empreendimento, a topografia encontra-se descaracterizada, de forma que foram realizadas escavações em determinados locais que rebaixaram as cotas do terreno com conseqüente remoção da vegetação. Esta ação antrópica expôs uma série de taludes e demais afloramentos que permitiram observar as rochas correspondentes à geologia da área de ampliação.

A Figura 14 trata de um registro fotográfico obtido na etapa de campo que mostra a descaracterização e remoção da cobertura vegetal de parte do terreno, expondo parcialmente afloramentos rochosos.

As litologias aflorantes identificadas tratam de um arenito de cor avermelhada (Figura 15, A e B), sob intensa alteração intempérica, de granulometria fina a média. Sua estrutura é marcada por laminação plano-paralela, intercalando níveis ricos em quartzo com níveis argilosos, decorrentes da alteração intempérica dos feldspatos.

Realizou-se a coleta de uma amostra para laminação, que se apresentou bastante friável e alterada. A descrição desta amostra, assim como a localização do ponto de coleta consta no item 7.1.2 - Análise Petrográfica.



Figura 14. Fotografia da etapa de campo da área de ampliação, mostrando a descaracterização original da topografia e consequente remoção da vegetação, expondo as rochas alteradas correspondentes à geologia local.

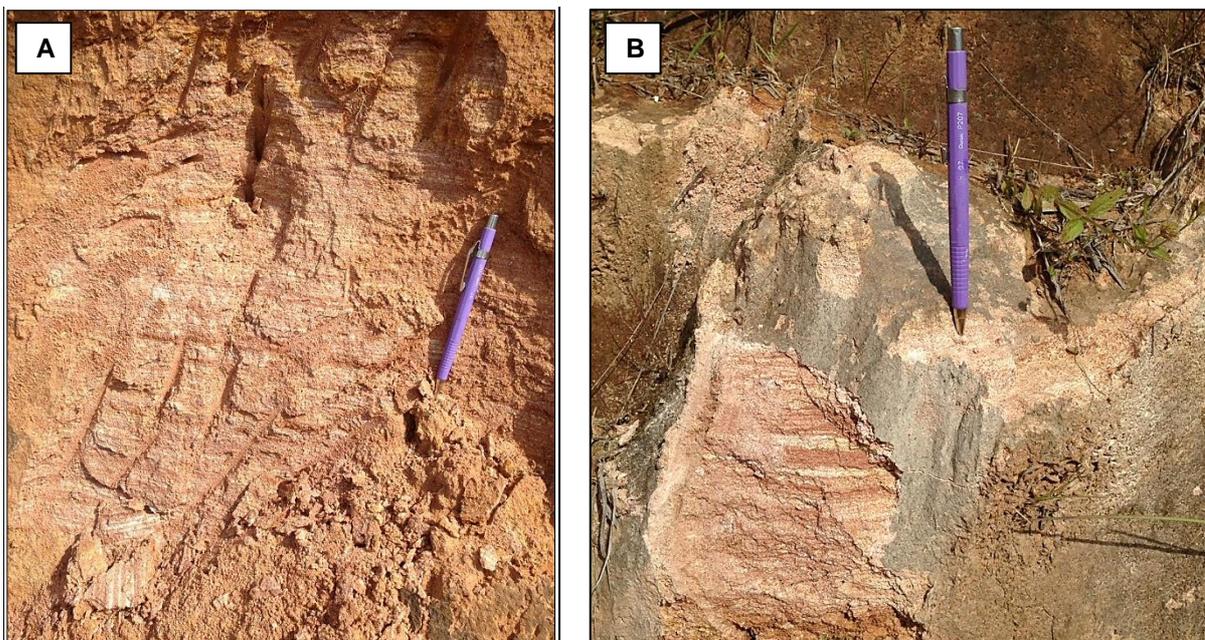


Figura 15. Litologia aflorante na área de ampliação do empreendimento (A), com detalhe para a laminação plano-paralela (B).

Além destas informações, o diagnóstico ambiental realizado na área de ampliação (GEOPROSPEC, 2012) reforça a ocorrência desta mesma litologia ao longo de toda área de ampliação.

O novo mapa geológico confeccionado para a área do empreendimento, incluindo o quadrante 05, que trata da área de ampliação, é exposto na Figura 16.

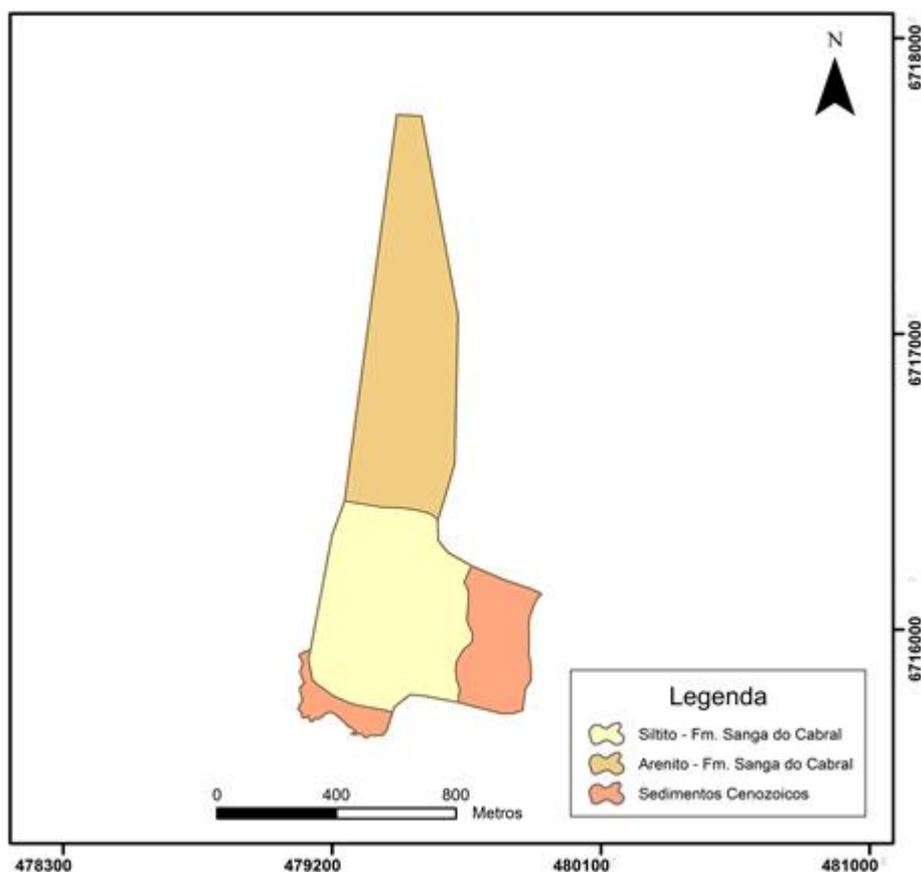


Figura 16. Unidades geológicas presentes na área de estudo. Modificado de: Augustin Jr (2011).

7.1.2 Análise Petrográfica

A análise petrográfica foi realizada em uma amostra coletada na área de ampliação do empreendimento. A lâmina UT-04 confeccionada para a etapa de análise e caracterização petrográfica insere-se no contexto dos arenitos da Formação Sanga do Cabral. A localização desta amostra consta na Figura 17.

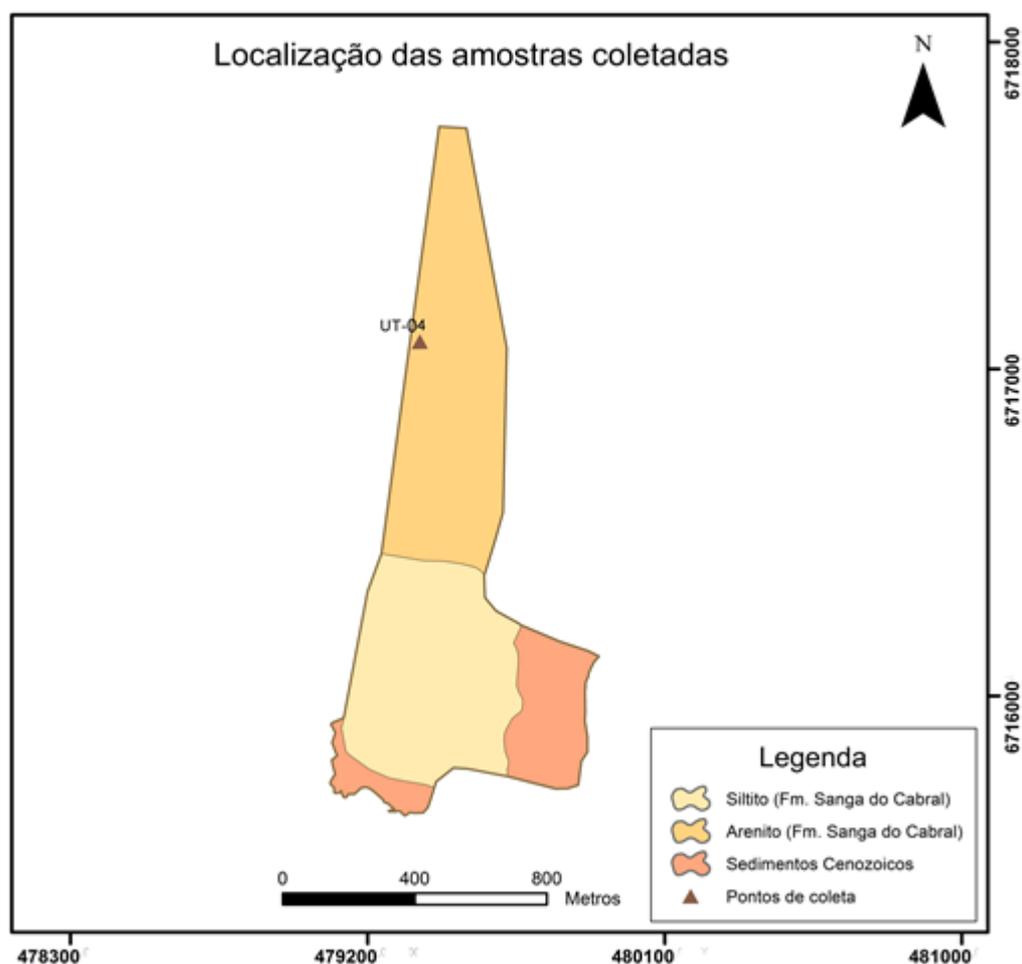


Figura 17. Localização da amostra UT-04 enviada para laminação.

A caracterização petrográfica mostrou a ocorrência de um arenito fino a médio com laminação plano-paralela. As lâminas diferenciam-se principalmente por tamanho de grão e coloração. As lâminas de menor espessura, com até 2mm, são compostas por grãos de tamanho areia fina a areia muito fina, além de argilominerais em abundância. Os grãos encontram-se com oxidação e fraturas intensas.

Nas lâminas de maior espessura (até 3mm) a granulometria é maior, predominando grãos de tamanho areia média a areia grossa, e alguns grãos de tamanho areia fina preenchendo espaços intergranulares. Há também ocorrência significativa de argilominerais (caulinita, esmectita).

Os grãos da fração areia média apresentam-se subarredondados a arredondados, com boa esfericidade, enquanto os grãos de areia fina tendem a ser mais subangulosos e apresentam baixa esfericidade.

A lâmina apresenta parte significativa de sua porosidade primária obstruída pelas “massas” de argilominerais que ocorrem. Por sua vez, alguma porosidade secundária é gerada com a dissolução de grãos de feldspatos e biotita (Figura 18, Figura 19 e Figura 20).

A mineralogia principal é composta por quartzo (70%), microclínio (20%), biotita (5%). Ocorrem em menores quantidades fragmentos de arenitos (2%) e piroxênios (2%). A mineralogia secundária é composta pelos argilominerais que obstruem boa parte da porosidade da rocha, sendo essencialmente caulinita, e menos comum, esmectitas.

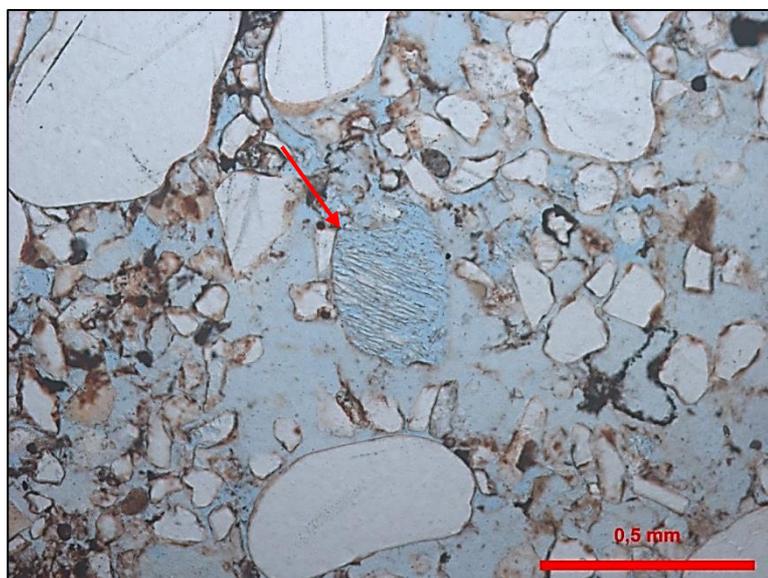


Figura 18. Fotomicrografia da amostra UT-04 a nicóis descruzados, mostrando a geração de porosidade secundária pela dissolução de grãos, sinalizado pela seta vermelha.

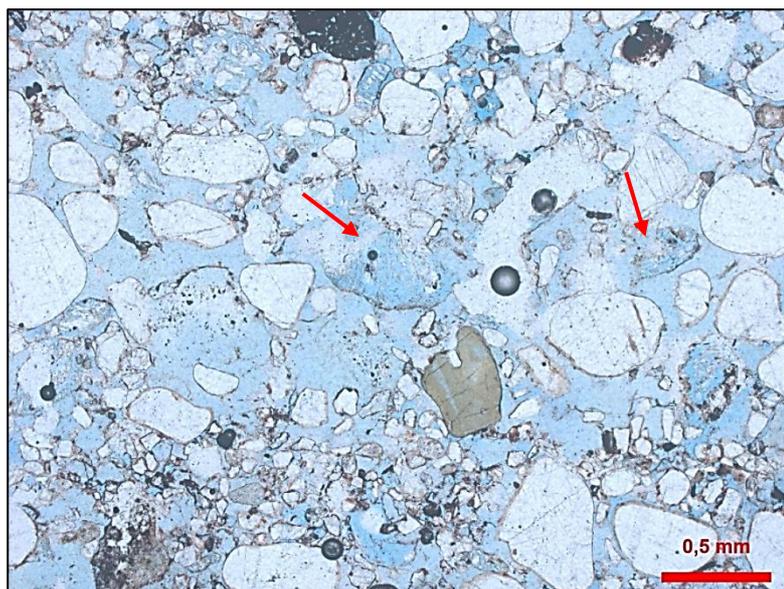


Figura 19. Fotomicrografia da amostra UT-04 a nicóis descruzados, mostrando a porosidade primária e secundária, gerada pela dissolução de grãos (apontadas pela seta vermelha).

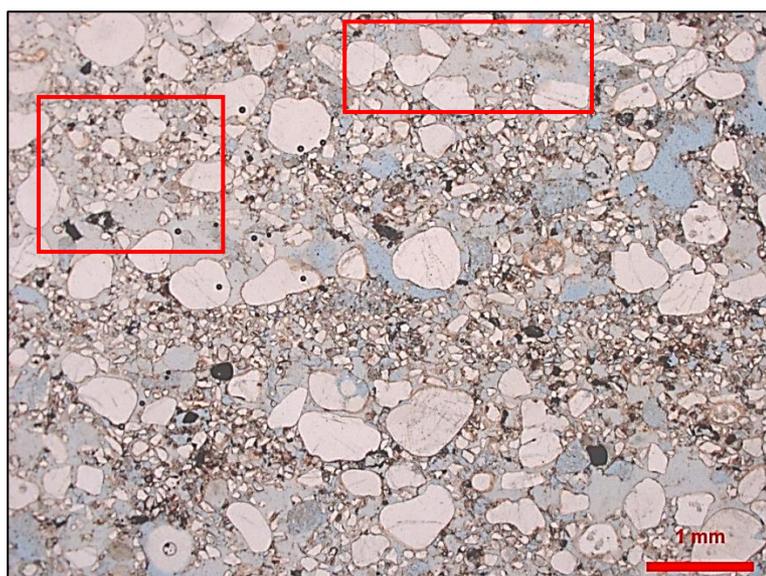


Figura 20. Fotomicrografia da amostra UT-04 a nicóis descruzados, mostrando a diferença do tamanho de grãos nas laminação da amostra. Também é possível observar a obstrução parcial da porosidade primária por argilas, destacadas em vermelho.

Além desta amostra, foi realizada a coleta de uma amostra pertencente ao contexto geológico dos siltitos da Formação Sanga do Cabral, na área de operação do empreendimento. Foi realizada uma tentativa de confecção de uma lâmina desta amostra, mas que não pode ser finalizada por dificuldades na impregnação da resina no processo da laminação.

7.1.3 Análises granulométricas e mineralógicas

As amostras de solos enviadas para análise granulométrica e mineralógica foram coletadas em 04 locais nas dependências do empreendimento, de forma a abranger contextos geológicos distintos (Sedimentos Cenozoicos e Formação Sanga do Cabral). Os locais de coleta estão indicados no mapa da Figura 21.

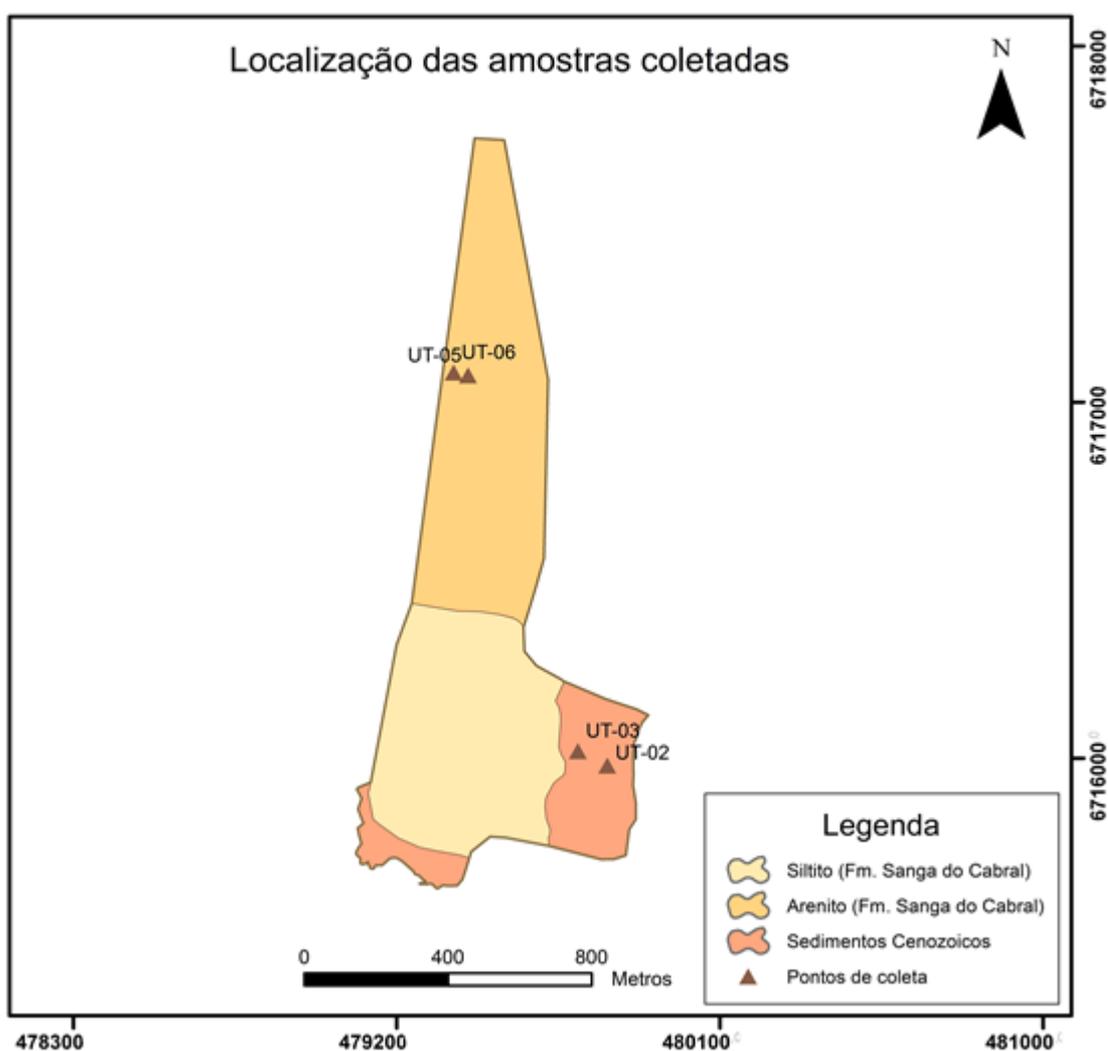


Figura 21. Localização das amostras coletadas para análise granulométrica, mineralógica e difração de raios x e seu contexto geológico.

As amostras UT-02 e UT-03 foram coletados nos pontos de coordenadas UTM SIRGAS 2000 479787mE, 6715980mN e 479705mE 6716021mN, respectivamente. Ambos estão localizados a uma distância de aproximadamente 90 metros entre si, no contexto geológico dos Sedimentos Cenozoicos. A amostra UT-03, todavia, foi

coletada próximo ao poço de monitoramento “PM-19”, situados próximo ao limite com a Fm. Sanga do Cabral.

As análises granulométricas realizadas indicam a ocorrência de solos arenosos nas duas amostras. Na amostra UT-02 a fração predominante é a areia fina, seguida por proporções similares de areia média e areia muito fina. A fração arenosa compreende cerca de 80,6% da amostra, enquanto a fração fina chega apenas a 19,3% (11,9% de silte e apenas 7,4% de argila). A relação entre as frações é expressa no gráfico da Figura 22.

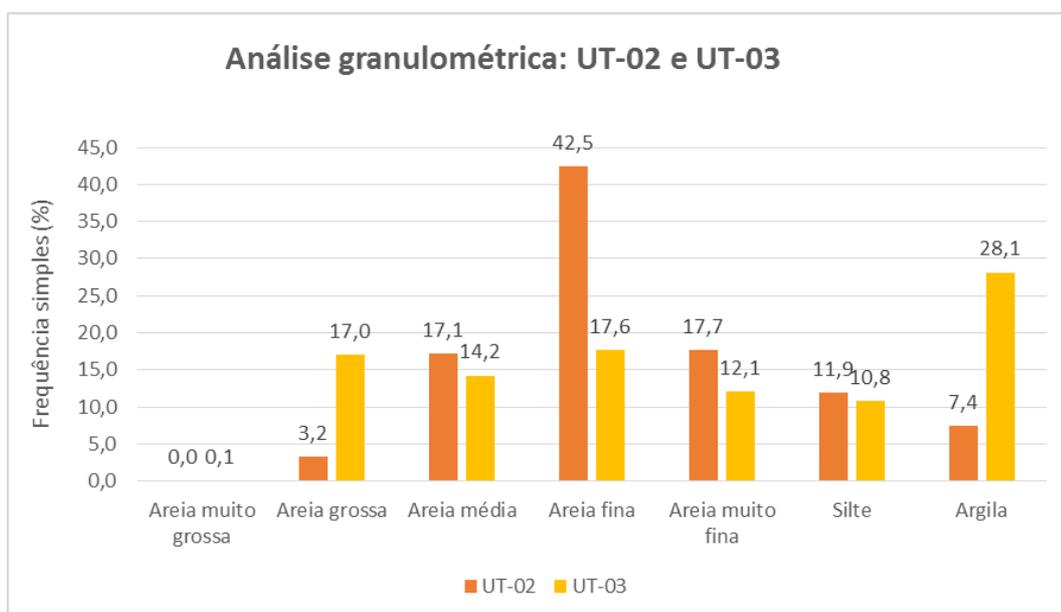


Figura 22. Frações de areia e finos nas amostras UT-02 e UT-03. As amostras foram coletadas no contexto dos Sedimentos Cenozoicos.

Por outro lado, a amostra UT-03 indicou a ocorrência de um solo arenoso com maior contribuição de finos. A fração areia neste ponto compreende cerca de 61% da amostra. A fração fina na amostra é de 39%, dos quais 28,1% pertencem à fração argila e apenas 10,9% à fração silte.

As amostras UT-05 e UT-06 foram coletadas nas coordenadas 479399mE; 6717076mN e 479359mE, 6717084mN, respectivamente, distando cerca de 50 metros entre si, no que corresponde à área de ampliação do empreendimento. O contexto geológico desta área abrange as rochas da Formação Sanga do Cabral. A litologia constatada na etapa de campo apresenta intercalações do siltito já observado em campo anteriormente por Augustin Jr (2011) e trabalhos de Geoprospec com um arenito fino, extremamente alterado e friável, cuja estrutura é marcada por uma

laminação plano-paralela. As lâminas são marcadas por níveis mais quartzosos com níveis de argilas, decorrentes da alteração intempérica dos feldspatos.

A análise granulométrica realizada na amostra UT-05 indica um solo arenoso, com aproximadamente 76,2% de areia, cujas frações dominantes são areia grossa e areia média. Ainda assim, as frações de areia fina e, principalmente muito fina, também possuem contribuição significativa. A fração fina é composta por 15,6% de silte, aproximadamente, e por 8,2% de argila.

A amostra UT-06 apresentou cerca de 69,1% de areia, sendo que areia grossa e areia média são dominantes, em proporções semelhantes, mas com contribuição significativa de areia fina e muito fina. A fração fina compreende 30,9% do total da amostra, sendo que argila e silte ocorrem em proporções praticamente iguais em torno de 15%. O gráfico da Figura 23 relaciona as amostras UT-05 e UT-06 quanto as porcentagens de cada fração de areia e finos.

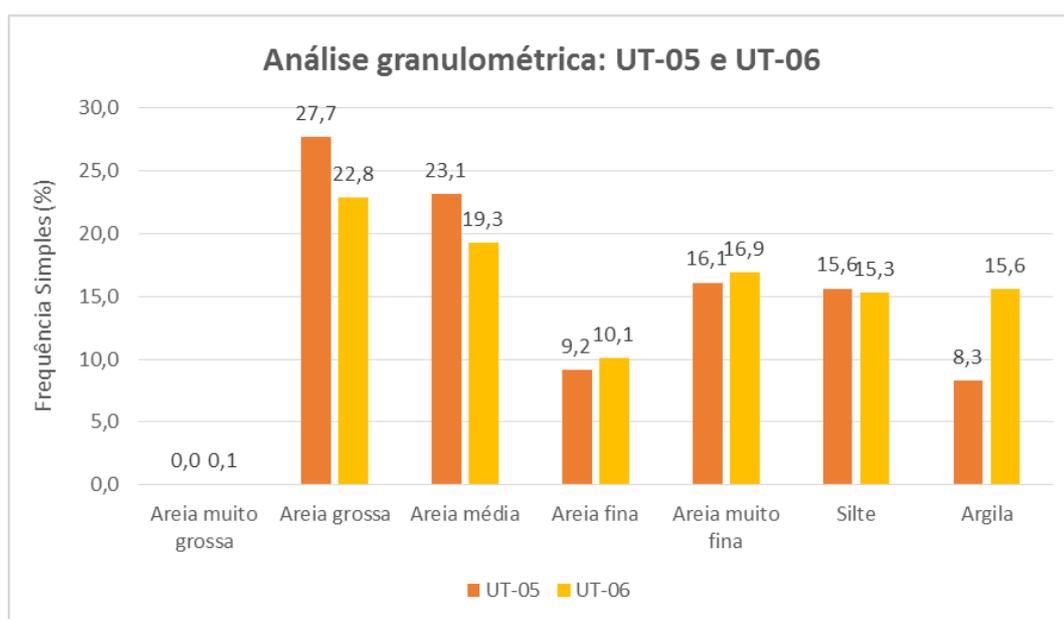


Figura 23. Frações de areia e finos nas amostras UT-06 e UT-05, inseridas no contexto geológico da Formação Sanga do Cabral.

As análises mineralógicas, realizadas com lupa, indicaram uma composição da fração arenosa da amostra UT-02 com cerca de 94% de quartzo, 4% de feldspatos e 1% de concreções férricas. Também foram observadas ocorrências de turmalina e magnetita. Os grãos apresentam no geral, baixa esfericidade e são moderadamente arredondados.

Na amostra UT-03, a análise mineralógica da fração arenosa indica que os grãos são bem arredondados, com quartzo predominante (95%), além de concreções férricas (5%).

Na análise mineralógica da fração arenosa das amostras UT-05 e UT-06 foi observado quartzo em proporção aproximada de 95%, 3% de concreções férricas e 3% de muscovita. Magnetita e limonita também foram observadas em proporções de até 1%. Os grãos, no geral, apresentaram bom arredondamento.

Além disso, ensaios de lixiviação realizados em amostras de solo para os trabalhos de Augustin (2011) indicaram baixos teores de metais avaliados (foram analisados As, Ba, Pb, Cu, Cr, Mn, Hg e Zn), o que implica em um baixo potencial de contaminação de águas subterrâneas pelo fenômeno de dessorção.

7.1.4 Difração de Raios X

A amostra UT-02, cuja localização do ponto de coleta já foi indicada no subitem acima, foi analisada pelo método do pó na difração de raios-X na fração fina. A análise apontou uma composição contendo caulinita, quartzo e K-feldspato. O difratograma interpretado encontra-se em anexo (anexo 1) ao final do projeto.

A análise de difração de raios-X pelo método do pó realizada na amostra UT-03 indica uma composição contendo caulinita, quartzo e hematita. A localização deste ponto também já foi indicada no item acima e seu difratograma interpretado encontra-se em anexo (anexo 2).

Nas amostras UT-05 e UT-06, a difração de raios X apontou ocorrência de esmectita, caulinita, quartzo e K-feldspato e hematita. O difratograma destas amostras também se encontra em anexo (anexo 3 e 4, respectivamente).

7.2 SOLOS: DADOS QUÍMICOS E AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO

As análises químicas dos solos na área foram realizadas para 18 pontos de coleta próximos aos poços de monitoramento PM 02, 08, 09, 11, 14, 18, 19, 25 e 26 (Figura 24) instalados na área. Os poços PM 19, 18, 14 e 09 pertencem ao contexto dos sedimentos Cenozoicos, e os PMs 02, 08, 11 e 26 estão no contexto geológico

dos siltitos da Formação Sanga do Cabral. O PM 25 foi instalado no contato entre estas duas unidades.



Figura 24. Localização dos poços de monitoramento, em imagem de satélite, perto dos quais são realizadas as coletas de amostras de solo para análise. Fonte: Google Earth.

As análises foram realizadas para dois períodos no ano de 2017, nos meses de abril e outubro, de forma que 16 parâmetros foram analisados. São eles: arsênio, bário, chumbo, cianeto, cloreto, cobre, cromo, manganês, mercúrio, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total kjedahl, nitrato, nitrito, nitrogênio total, sódio e zinco.

Ressalta-se que estas amostras foram coletadas em profundidades distintas, porém, na zona subsaturada do aquífero. Além disso, foram realizadas duas coletadas para o entorno de cada poço de monitoramento, que são nomeadas com a identificação do poço seguidas de “A” e “B”.

Considerando estas informações, não serão detalhadas as profundidades de coletas, por encontrarem-se na zona subsaturada, nem as coordenadas dos pontos de coleta, visto que sua referência de coleta são os próprios poços, não estando distantes de forma significativa destes.

A Tabela 5 apresenta os resultados das análises químicas de solo obtidos para o período de abril de 2017, expressos em mg.kg^{-1} . Já na Tabela 6 constam os resultados obtidos para o período de outubro de 2017. As amostras foram coletadas na zona subsaturada do aquífero.

Tabela 5. Resultados dos parâmetros analisados em abril de 2017 para as amostras de solos coletadas próximas aos respectivos poços, identificados na primeira coluna. Os resultados estão expressos em mg.kg⁻¹. Fonte: Geoprospec.

Parâmetros	As	Ba	Pb	CN	Cl	Cu	Cr	Mn	Hg	N – NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	N Total	Na	Zn
PM02A	<1	32,7	25,2	0,3	7,97	13,2	27,7	70,7	<0,05	6,1	4,86	0,42	394	81,6	31,6
PM 02B	<1	13	6,44	0,3	18,5	2,94	7,06	24,3	<0,05	5,1	13,1	4,03	360	54,9	6,52
PM 08A	<1	26,5	8,21	0,3	98,1	4,26	10	13,3	<0,05	5,7	31,1	<0,2	281	286	4,68
PM 08B	<1	20,8	7,26	0,3	97,1	3,77	6,44	12,4	<0,05	8,7	11,8	0,59	327	190	3,33
PM 09B	<1	5,07	<1	0,3	77	<1	<1	5,39	<0,05	6,5	1,39	1,15	119	102	2,23
PM 11A	<1	19,1	7,71	0,2	<5	4,62	10,4	78,2	<0,05	4,3	1,39	<0,2	489	57,7	9,24
PM 11B	<1	25,3	8,53	0,2	<5	5,47	6,58	119	<0,05	5,2	<1	<0,2	352	145	5,89
PM 14A	<1	5,15	4,05	0,3	<5	2,56	1,94	129	<0,05	3,9	<1	0,26	219	50	2,76
PM 14B	<1	27,8	6,87	0,4	8,48	4,34	5,2	69	<0,05	4,2	6,23	1,13	500	92,6	6,14
PM 18A	<1	17,5	4,6	0,3	10,8	1,71	2,92	41,2	<0,05	5,4	<1	0,32	474	50	2,96
PM 18B	<1	14,4	4,24	0,2	39,8	1,76	2,76	23,7	<0,05	7	3,05	2,33	215	50	2,91
PM 25A	<1	34,9	7,8	0,3	12,9	5,37	8,15	71,8	<0,05	6	1,8	1,44	328	294	18,6
PM 25B	<1	10,8	3	0,3	17,9	1,31	2,89	13,9	<0,05	4,5	<1	<0,2	263	376	2,45
PM 26A	1,72	36,9	4,48	0,3	<5	1,96	3,96	157	<0,05	3,1	0,9	<0,2	215	60,1	5,77
PM 26B	<1	14,2	1,45	0,3	183	<1	<1	1,31	<0,05	3,2	<1	<0,2	260	261	1,39

Tabela 6. Resultados dos parâmetros analisados em outubro de 2017 para as amostras de solos coletadas próximas aos respectivos poços, identificados na primeira coluna. Os resultados estão expressos em mg.kg⁻¹.

Parâmetros	As	Ba	Pb	CN	Cl	Cu	Cr	Mn	Hg	N – NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	N Total	Na	Zn
PM 02A	1,42	19,7	10,4	0,2	60	22	22,4	60,4	<0,05	1,2	<10	<2	418	55	19,9
PM 02B	2,75	26,2	8,6	0,2	70	17,8	31,3	135	<0,05	3,1	<10	3	303	88,3	21,3
PM 08A	2,84	19,1	4,99	0,2	<50	14	24,4	118	<0,05	1,6	<10	<2	469	219	33,7
PM 08B	2,29	21,4	5,06	0,2	60	15,5	18,1	72,4	<0,05	1,8	<10	<2	460	300	14,5
PM 09A	<1	19,5	6,47	0,1	<50	16,1	9,91	13,2	<0,05	1,9	<10	<2	498	75,7	12,1
PM 09B	2,25	50,6	5,78	0,2	59,9	18,3	30,1	25,5	<0,05	1,2	3,88	0,46	848	127	14,3
PM 11A	1,7	23,5	6,49	0,1	<50	16,5	10,6	121	<0,05	0,9	<10	<2	322	80,2	16
PM 11B	<1	13,4	5,37	0,2	<50	14,9	6,66	41	<0,05	1,4	<10	<2	332	73,5	11,2
PM 14A	1,48	5,8	3,84	0,2	<50	13	6,27	119	<0,05	0,8	<10	<2	420	53,8	10,9
PM 14B	1,67	7,34	2,72	0,2	<50	6,18	6,77	76,1	<0,05	<1	11,1	<2	118	50	14
PM 18A	<1	15,2	3,55	0,2	<50	13,2	4,49	27,2	<0,05	2,2	<1	<0,2	356	50,8	10,5
PM 18B	<1	17,3	4,21	0,2	60	11,1	4,97	33,6	<0,05	<1	<10	<2	361	50	10,3
PM 19A	1,67	15,8	6,28	0,2	8,46	15,3	36,2	38,8	<0,05	1,4	<1	<0,2	381	79,4	15,5
PM 19B	2,96	14,9	5,63	0,2	<50	13,7	10,5	43,7	<0,05	2	<1	<0,2	331	96,1	16,6
PM 25A	<1	27,1	7,24	0,2	60	16,2	11,6	71,9	<0,05	1,6	<10	<2	492	260	28,4
PM 25B	<1	8,18	2,08	0,2	63,8	15,7	7,36	11,7	<0,05	2,4	<10	<2	399	366	11,3
PM 26A	1,72	54,5	7,02	0,2	<50	20,9	17,8	229	<0,05	1,2	<10	<2	316	82,9	25,7
PM 26B	<1	16,7	4,62	0,2	60	13,1	11,6	49,7	<0,05	1,9	<1	<0,2	399	59,5	16,1

A partir dos dados apresentados nas tabelas acima, alguns elementos foram plotados em gráficos de dispersão de pontos. Os metais que possuem concentrações naturais no solo, como o bário, chumbo, zinco e manganês, foram utilizados nesses gráficos a fim de identificar a fração que apresenta correlação, que é a ocorrência natural de cada metal, e identificar a fração contaminante, que não se enquadram na correlação, aparecendo como “*outliers*”.

As principais correlações observadas compreenderam os metais Chumbo (Pb), Bário (Ba) e Cromo (Cr), cujas correlações também foram comparadas àquelas apresentadas por Augustin (2011) e são apresentadas na Figura 25.

O **arsênio** ocorre em apenas uma amostra no primeiro período de coleta (abril), a uma concentração de $1,72 \text{ mg.kg}^{-1}$. Já em outubro, a coleta nos mesmos pontos indicou concentrações de arsênio em 11 das 18 amostras coletadas, variando de $1,42 \text{ mg.kg}^{-1}$ a $2,96 \text{ mg.kg}^{-1}$. A partir destes dados é possível observar que houve um aumento considerável deste parâmetro no período de outubro, representando pontos de contaminação.

O **bário** está presente em todas as amostras coletadas nos dois períodos. Considerando que este é um elemento que apresenta ocorrência natural nos solos, substituindo o cálcio e/ou o potássio em minerais, suas concentrações foram plotadas em diagramas de dispersão de pontos com outros metais que também apresentam concentrações naturais no solo. Nos gráficos C, E, F da Figura 25 é possível observar a correlação do bário com o chumbo, zinco e manganês, respectivamente. Chumbo e bário apresentaram uma boa correlação, de forma que 5 amostras (duas do mesmo poço) ficaram fora da linha de tendência. Estas amostras, sinalizadas com triângulos no diagrama, representam pontos de contaminação de bário. As concentrações das amostras contaminadas variam de $32,7 \text{ mg.kg}^{-1}$ a $54,5 \text{ mg.kg}^{-1}$. Não houve aumento das concentrações deste parâmetro no segundo período de coleta.

O **chumbo** também é um metal de ocorrência natural nos solos. Quando analisada a dispersão dos pontos em relação a outros elementos, nos gráficos, A, B e C da Figura 25, indicou uma boa correlação em todos os casos, com somente uma amostra fora do *trend* de pontos, com concentração de $25,2 \text{ mg.kg}^{-1}$.

Apesar das baixas concentrações amostradas no chorume (item 4) o chumbo é comum em resíduos de indústrias de indústria de baterias e siderúrgicas, de forma que esta amostra representa uma fonte de contaminação antrópica. Augustin Jr (2011)

também identificou contaminação de chumbo em apenas uma amostra na área, entretanto, com concentração acima de 60 mg.kg^{-1} , superior à observada neste estudo.

O **cianeto** foi registrado nas amostras analisadas em concentrações baixas, que variam de 0,1 a $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$. Suas concentrações no chorume variaram de 0,014 a 0,026. Este parâmetro não é um constituinte natural do solo e representa uma fonte de contaminação antrópica.

Em alguns dos pontos de coleta, as concentrações de **cloreto** foram inferiores ao limite de detecção da técnica analítica usada pelo laboratório. Nos pontos em que foi identificado, o cloreto variou de concentrações de 7,97 a 183 mg.kg^{-1} . Este parâmetro também não é um constituinte natural do solo e representa uma fonte de contaminação nos pontos de ocorrência.

O **cobre** é um metal que tem ocorrência natural nos solos, o qual é encontrado principalmente em minerais sulfetados. Sua amostragem no chorume registrou teores relativamente baixos, de 0,022 a 0,034 (item 4). O cobre é um componente importante em ligas, cabos, e equipamentos eletrônicos, de forma que o refino eletrolítico deste elemento é um importante gerador de resíduo. Correlacionando o cobre com chumbo e cromo, nos gráficos B e D da Figura 25, é possível observar uma linha de correlação entre os elementos. Entretanto, da mesma forma que o comportamento observado para o arsênio, no segundo período de coleta houve um aumento significativo neste parâmetro, representando uma fonte de contaminação. A possível hipótese deste aumento será comentada mais adiante. A menor concentração de cobre registrada foi de 1,31 e a maior de 22 mg.kg^{-1} .

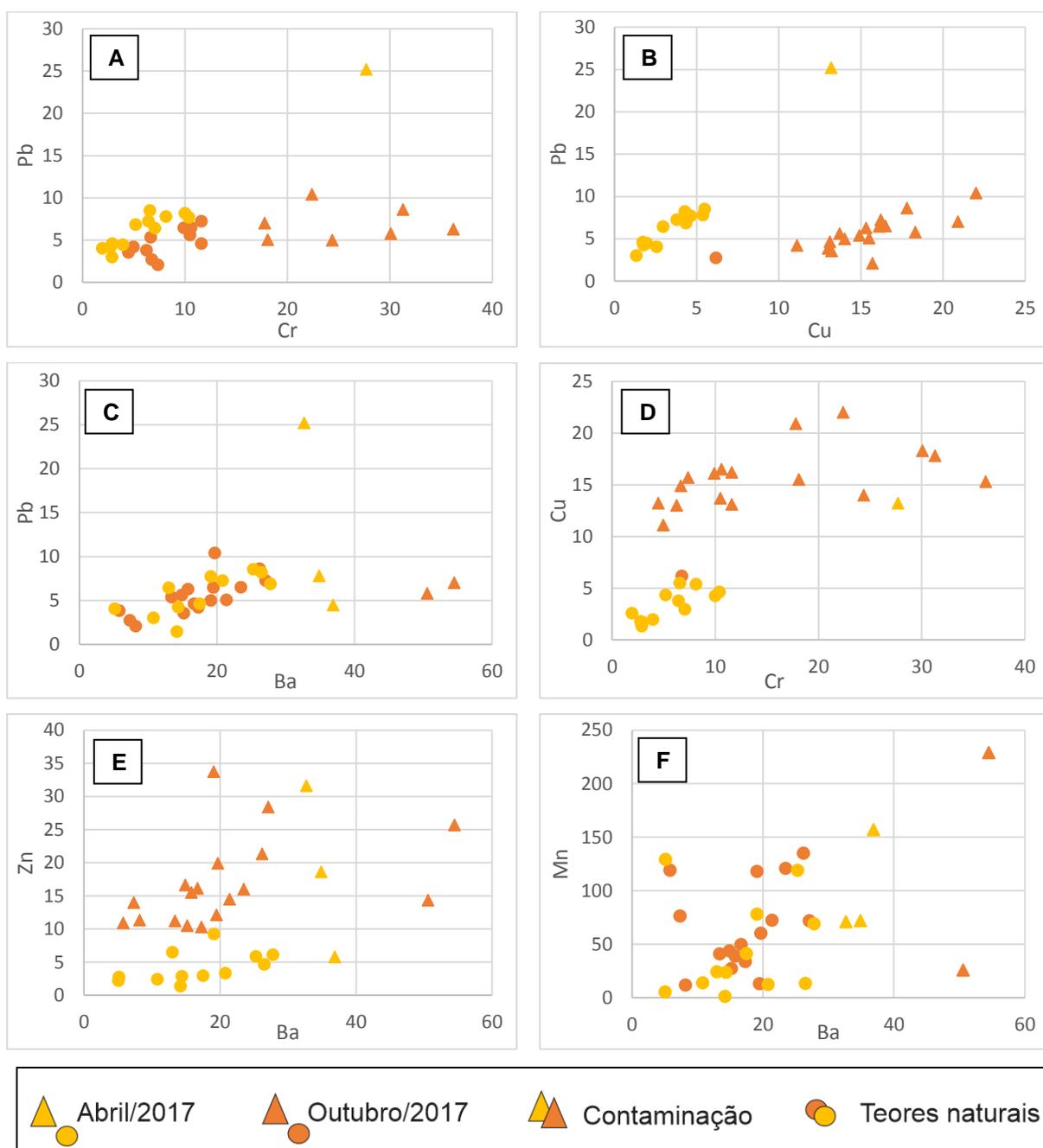


Figura 25. Gráficos de correlação entre os elementos Cr e Pb (A); Cu e Pb (B); Ba e Pb (C); Cr e Cu (D); Ba e Zn (E); Ba e Mn (F), considerando os teores em mg.kg⁻¹ das amostragens realizadas em abril e outubro de 2017. Nota-se um aumento significativo de Cr, Cu, e Zn nas análises realizadas no período de outubro.

O **cromo trivalente** é um importante metal identificado nas amostras de chorume, dado o grande volume de resíduos oriundos da indústria de couros e calçados, que contém este elemento. Os gráficos de dispersão A e D da Figura 25 registram correlação com os parâmetros analisados e um aumento na concentração de algumas amostras no período de coleta de outubro, como também observado para o arsênio e cobre e que será discutida adiante. Os pontos que registram contaminação apresentam-se fora do *trend* e totalizam sete amostras. As concentrações de Cr^{3+} na área variam de 1,94 a 36,2 mg.kg^{-1} .

O **manganês** é um constituinte natural dos solos da área e não representa uma fonte de contaminação, de forma que apresenta boa correlação com o bário, que pode ser observado no gráfico F da Figura 25.

O **mercúrio** esteve abaixo do limite de detecção em todas as amostras coletadas, tanto no período de abril quanto no período de outubro.

O **nitrogênio amoniacal** foi registrado a baixas concentrações, variando de 0,8 a 8,7 mg.kg^{-1} , inferiores aos valores observados no trabalho de Augustin Jr (2011), cuja concentração máxima registrada foi de 1741 mg.kg^{-1} . Embora os valores registrados sejam baixos, este não é um constituinte natural do solo, e suas elevadas concentrações registradas no chorume (item 4) indicam a contaminação antrópica.

Os teores de **nitrogênio total** são expressivamente inferiores aos registrados por Augustin Jr (2011) e não representam fonte de contaminação.

O **nitrito e nitrato**, por sua vez, apresentaram concentrações inferiores no segundo período de análise quando comparadas com a coleta de abril. Ambos são constituintes naturais dos solos. Considerando que o nitrato é lixiviado durante a estação chuvosa (USDA, 2014), sua queda no segundo período de coleta pode estar associado com o regime de chuvas neste intervalo de tempo, que será discutido mais adiante neste capítulo. Boa parte das amostras apresentou valor inferior ao limite de detecção da técnica, sendo que a maior concentração registrada de nitrato foi de 31,1 mg.kg^{-1} , em abril, e de 4,04 mg.kg^{-1} de nitrito, também no mês de abril. Estes dois parâmetros não representam fontes de contaminação para os solos da área.

O **sódio** é um constituinte natural dos solos e ocorre na área em concentrações entre 30 a 366 mg.kg^{-1} , e não representa fonte de contaminação antrópica.

As concentrações **zinco** foram plotadas em um diagrama de correlação de pontos com o bário, no gráfico F da Figura 25. Apesar do zinco constituir em um

elemento natural nos solos, é possível observar que suas concentrações aumentaram em praticamente todas as amostras coletadas no período de outubro, da mesma forma que o comportamento do arsênio, cromo e cobre, indicando pontos de contaminação.

A partir dos resultados obtidos e discutidos acima, observa-se que os contaminantes identificados nos pontos amostrados compreendem: arsênio, bário, chumbo, cianeto, cobre, cloreto, cromo trivalente, nitrogênio amoniacal e zinco. Os pontos em que ocorre contaminação por estes parâmetros podem ser visualizados nos mapas constantes na Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31.

Alguns elementos como o arsênio, cobre, cromo e zinco apresentaram um crescimento considerável em suas concentrações em quase todos os pontos no segundo período de coleta, indicando pontos de contaminação. O crescimento destes parâmetros pode ser observado nos diagramas da Figura 25. Já o nitrato, apresentou uma queda no segundo período de coleta. Considerando o curto espaço de tempo entre as duas coletas (5 meses), e dada a natureza superficial do transporte de contaminantes (AUGUSTIN JR, 2011), tem-se como hipótese para justificar estas concentrações crescentes a pluviosidade sazonal.

Foram coletados dados pluviométricos da estação Porto Alegre, código 83967, obtidos do banco de dados do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Utilizou-se os valores da precipitação total mensal de um período de 27 anos (1990-2017) para calcular a média do período. Estes dados também foram usados para fins de cálculo da recarga ao aquífero (item 7.6.2 - Método **DRASTIC**).

A média mensal obtida é correlacionada com a precipitação ao longo do ano de 2017 no gráfico da Figura 26. Nele é possível observar que o regime de chuvas no ano de 2017 foi superior à média em 09 dos 12 meses do ano. Além disso, o período entre maio a outubro, após a segunda coleta registrou chuvas acima da média em maio, junho, setembro, e principalmente outubro, que foi o mês mais chuvoso do ano, coincidindo com o mês de coleta.

Dessa forma, as chuvas e seu escoamento superficial podem estar trazendo contaminantes ao percolar em células e lagoas de tratamentos de resíduos próximas, ou da ETE do local, trazendo consigo estes contaminantes e aumentando consideravelmente suas concentrações. No caso do nitrato, que é lixiviado durante a

estação chuvosa (USDA, 2014), o regime de chuvas pode ser o responsável pela queda nas suas concentrações no segundo período de análise.

Dado que as amostras de solo foram coletadas na zona subsaturada do aquífero livre, a contaminação decorre do escoamento superficial que devido a maior intensidade de chuvas na segunda coleta pode ter trazido contaminantes ao percolar células de resíduos próximas, ou da ETE do local, trazendo e aumentando consideravelmente suas concentrações no solo.

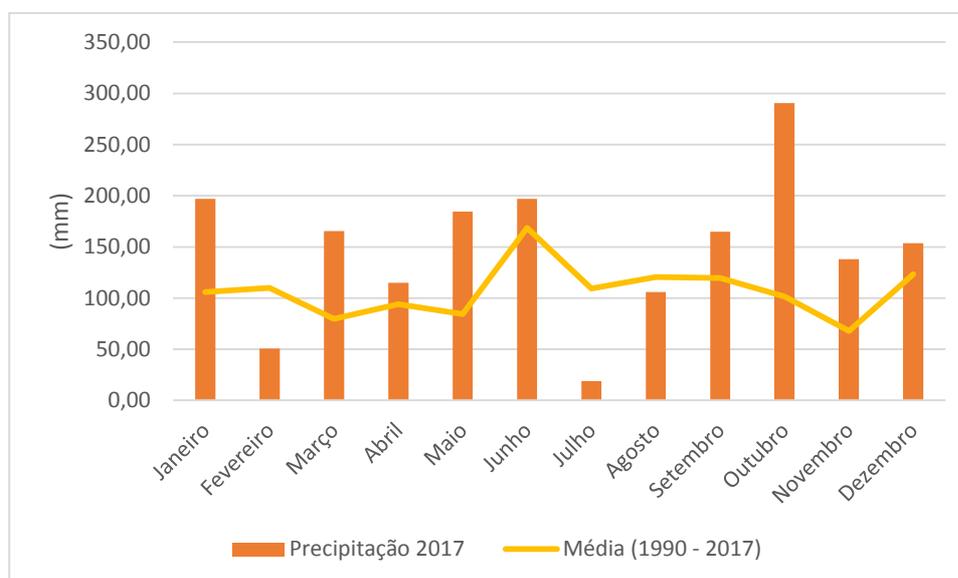


Figura 26. Gráfico representando a precipitação mensal medida ao longo do ano de 2017 em comparação com as médias calculadas entre 1990 e 2017. Observa-se que com exceção dos meses de fevereiro, julho e agosto, o regime de chuvas foi superior as médias mensais.

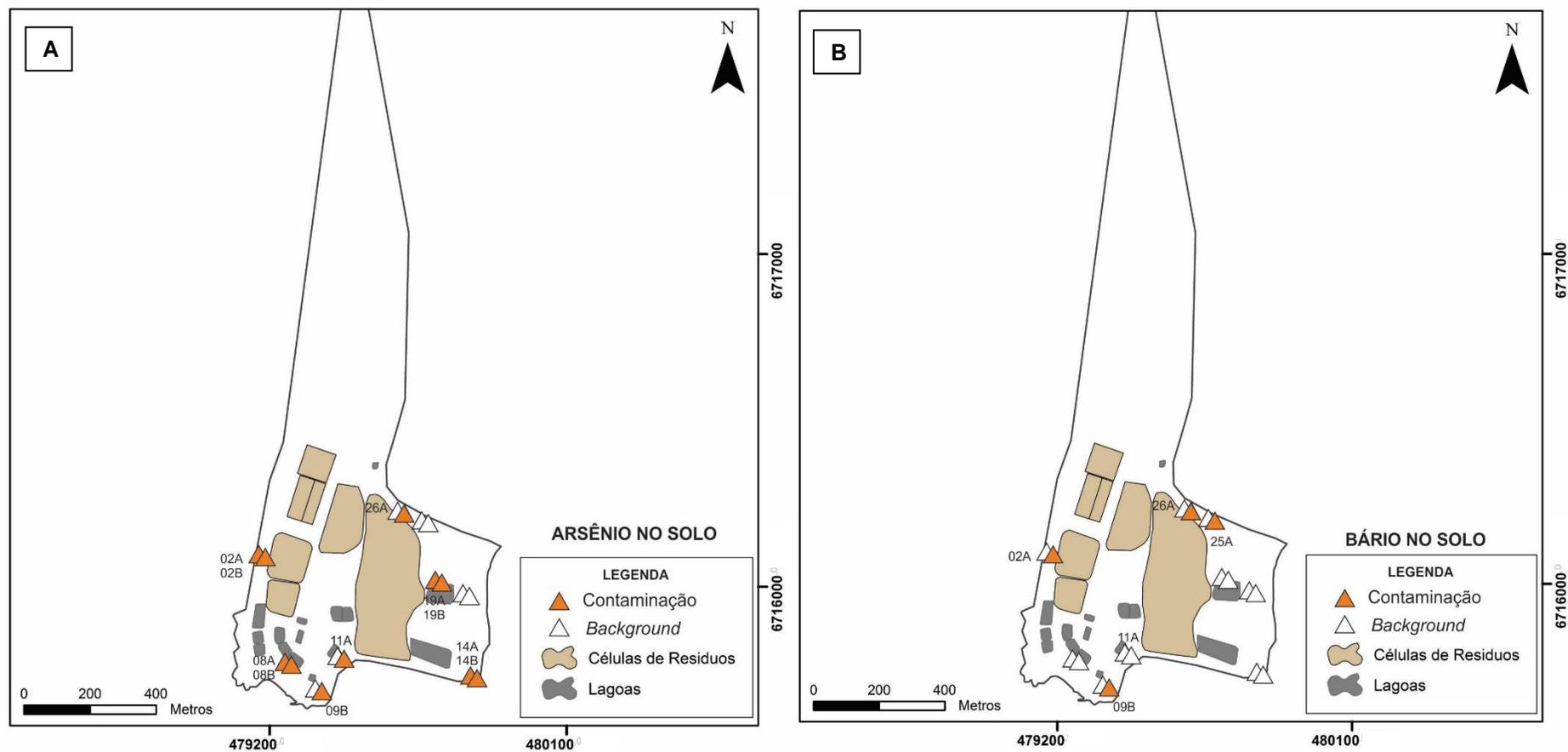


Figura 27. Pontos com contaminação de arsênio (A) e bário (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por arsênio é registrada em 11 amostras, e por bário, em 04. Modificado de: Augustin Jr (2011).

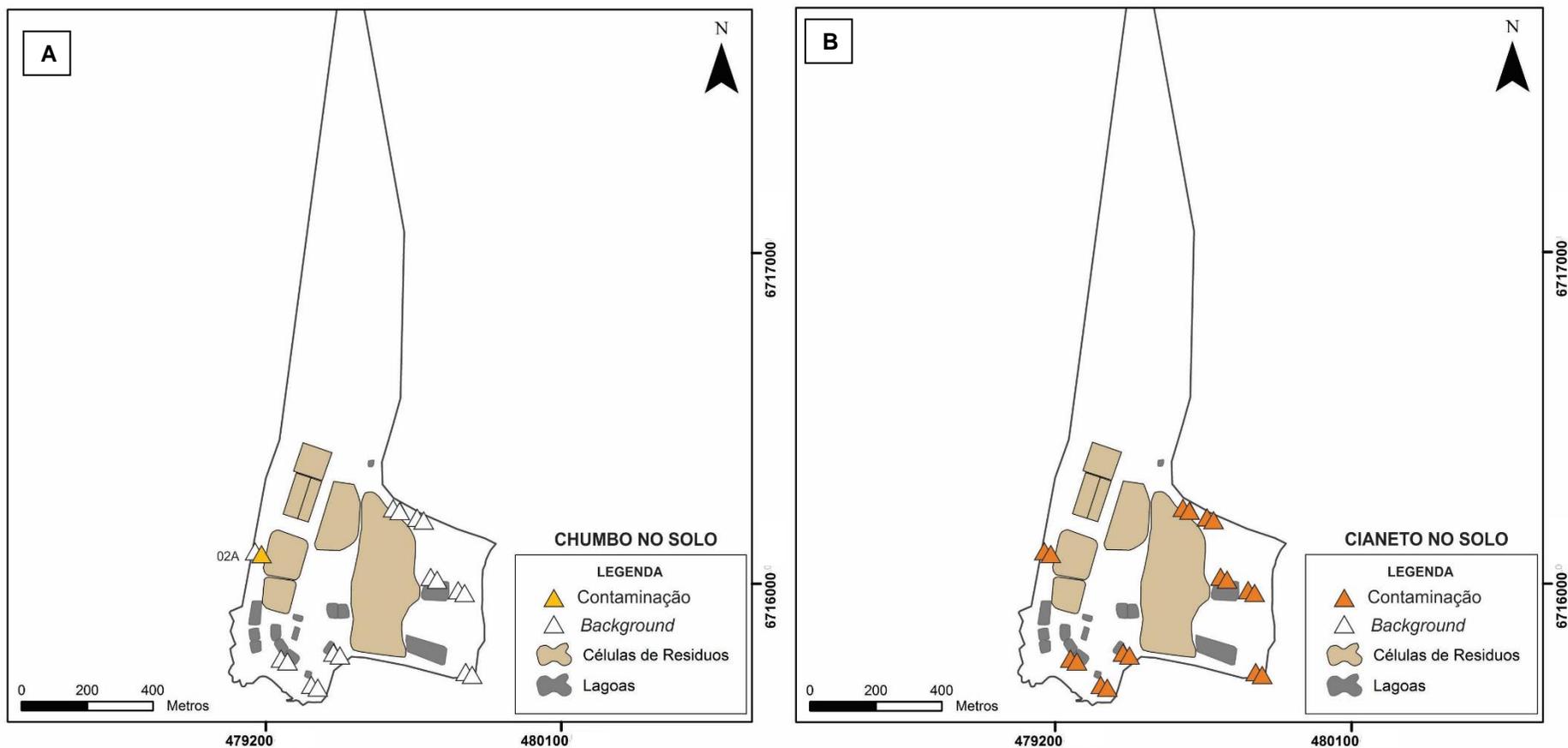


Figura 28. Pontos com contaminação de chumbo (A) e cianeto (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por chumbo foi registrada em apenas uma amostra no primeiro período de análise, reduzindo para os valores do *background* na segunda coleta. O cianeto é registrado a baixas concentrações em todos os pontos de coleta. Modificado de: Augustin Jr, 2011.

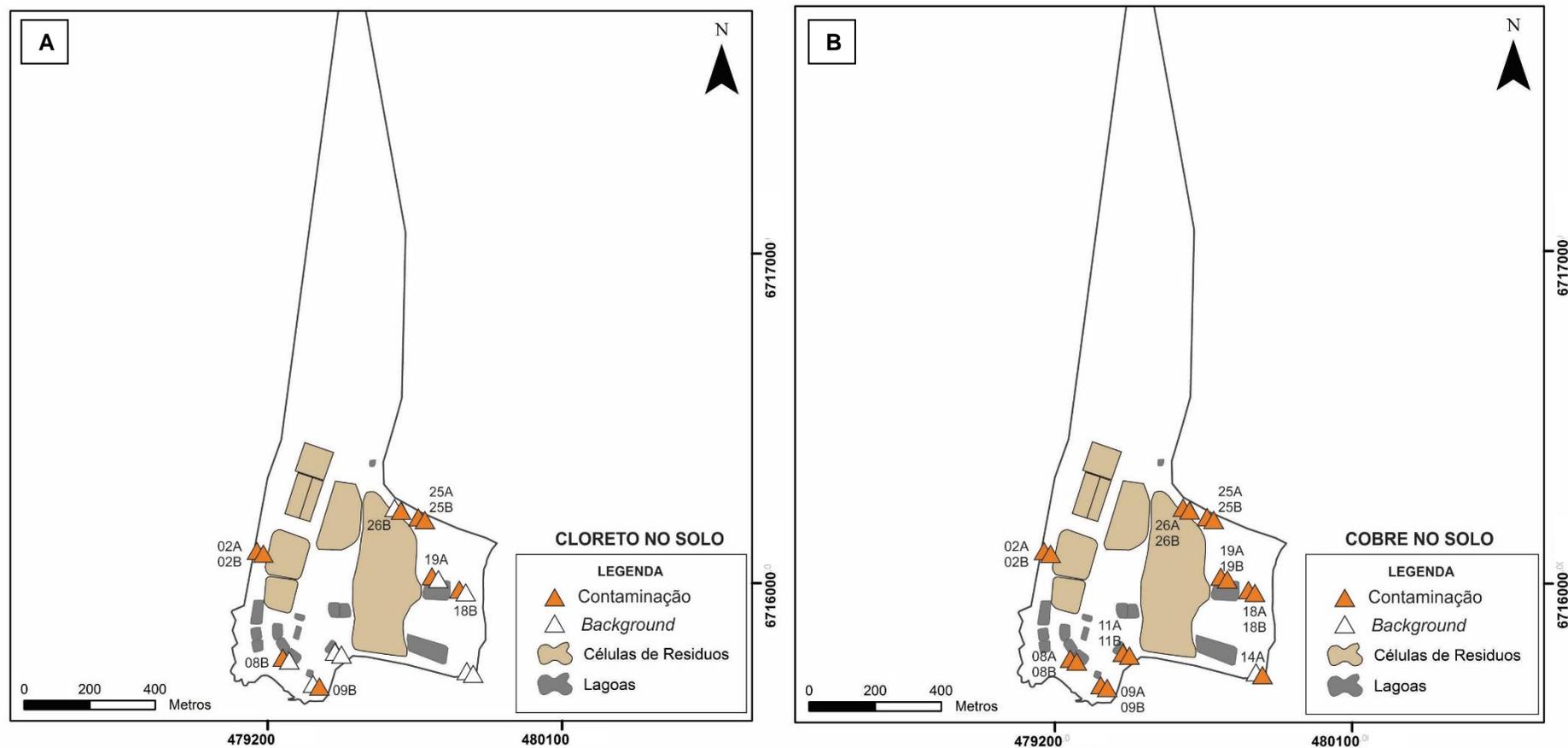


Figura 29. Pontos com contaminação de cloreto (A) e cobre (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por cloreto foi registrada em nove amostras. O cobre aumentou em basicamente todos pontos da segunda coleta, apresentando contaminação em 17 das 18 amostras. Modificado de: Augustin Jr, 2011.

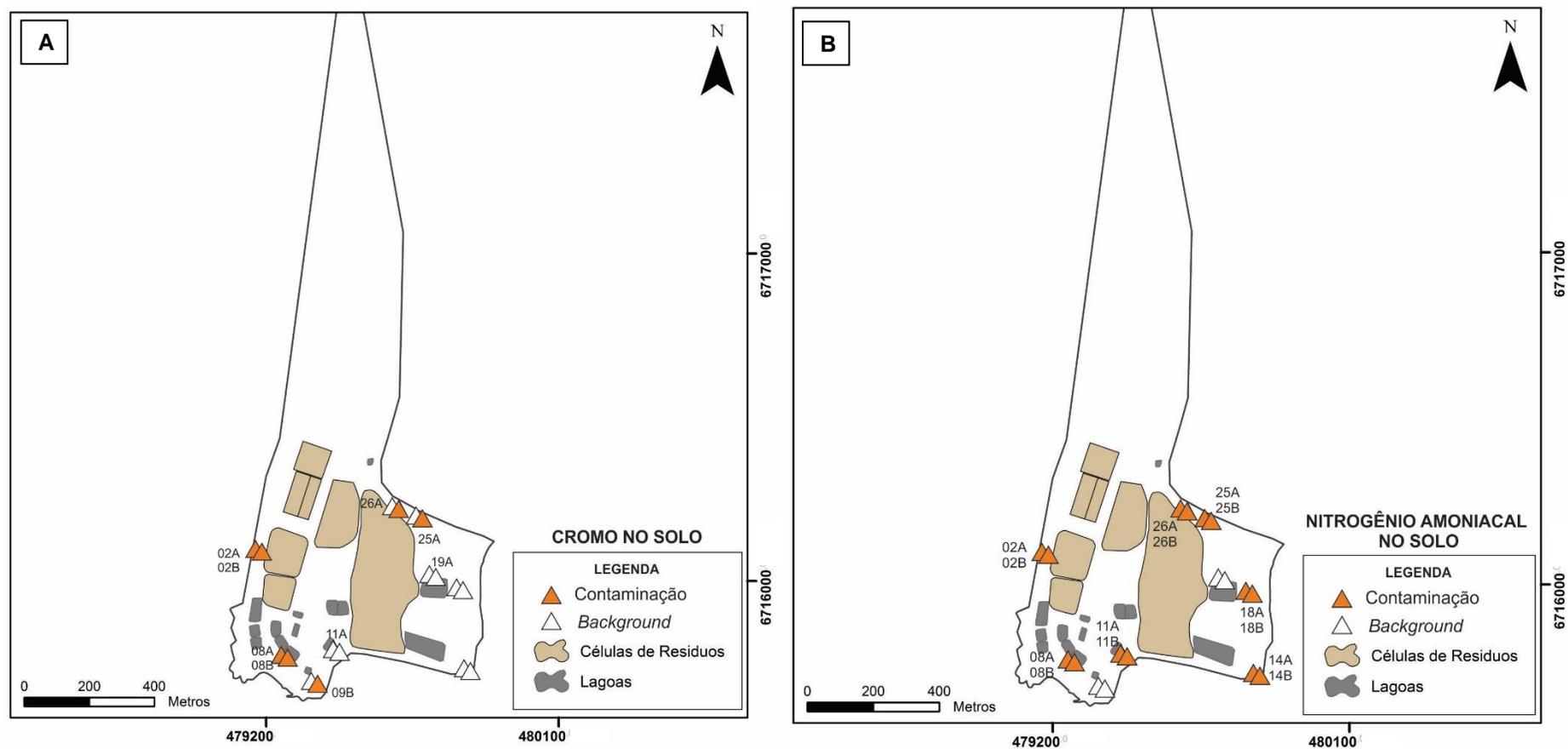


Figura 30. Pontos com contaminação de cromo (A) e nitrogênio amoniacal (B) nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação por cromo foi registrada em 07 amostras, e o nitrogênio amoniacal ocorre em 14. Modificado de: Augustin Jr, 2011.

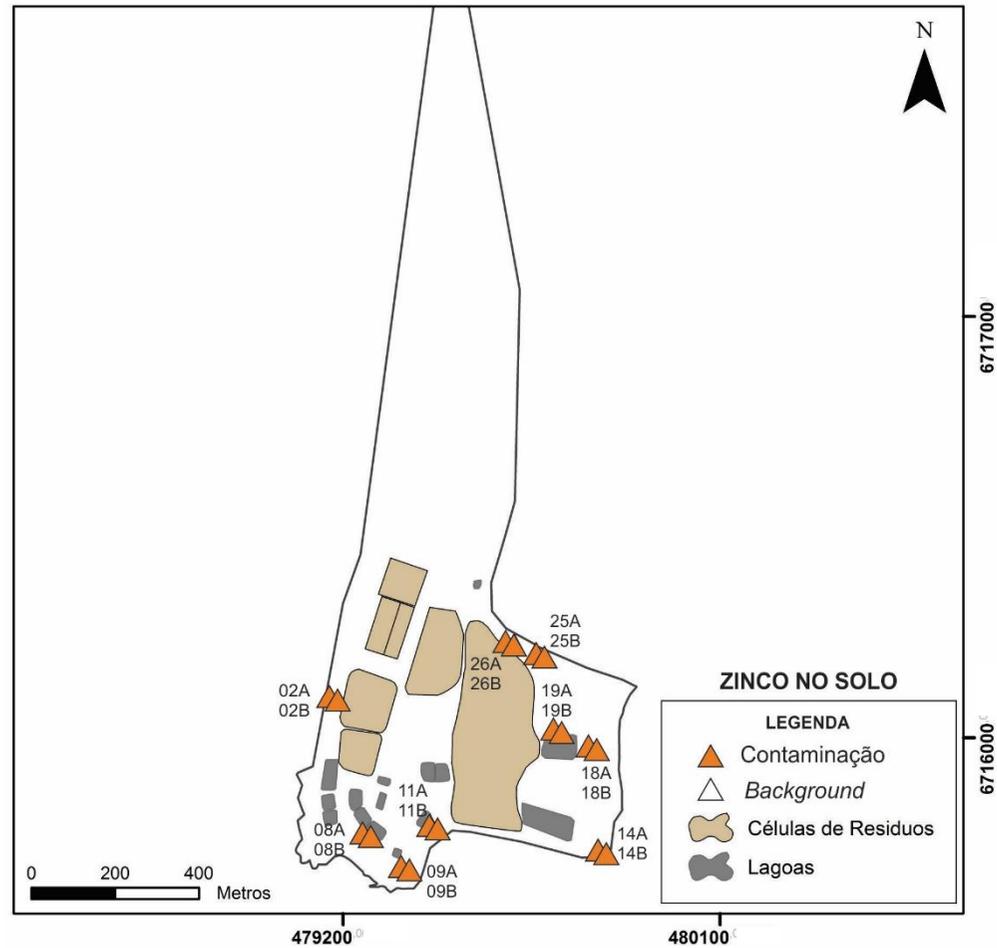


Figura 31. Pontos com contaminação zinco nas amostras de solo analisadas, e sua posição em relação às células de resíduos e lagoas do empreendimento. A contaminação de zinco foi registrada em todas as amostras coletadas em outubro, de forma que este parâmetro obteve um aumento significativo em relação aos valores obtidos para as coletas de abril. Modificado de: Augustin Jr, 2011.

7.3 QUALIDADE DOS SOLOS EM RELAÇÃO À LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

A resolução CONAMA nº 420 de 2009 e seguida de sua substituta, 460 de 2013, atribuem ao órgão ambiental do estado a função de definir os valores de referência de qualidade – VRQs dos metais que ocorrem naturalmente nos solos da região.

Sendo assim, a portaria da FEPAM nº 85/2014 (FEPAM, 2014) estabeleceu os VRQs para nove elementos químicos presentes nas províncias geológicas do Rio Grande do Sul.

Como a área de estudo compreende as rochas sedimentares da Bacia do Paraná e sedimentos cenozoicos, o domínio utilizado para os VRQs foi o domínio 3 estabelecido pela portaria, que compreende as “rochas sedimentares pelíticas da depressão periférica” (FEPAM, 2014), visto que os locais de coleta de amostras de solo na área encontram-se sob o domínio dos siltios da Formação Sanga do Cabral e sobre os Sedimentos Cenozoicos.

Tabela 7. Valores de referência de qualidade (VRQ), prevenção (VP) e investigação (VI), em mg.kg⁻¹, para os elementos dos solos da área. Modificado de: FEPAM (2014); CONAMA (2009). Os parâmetros que estão sem os valores na tabela não são estabelecidos pela legislação vigente.

Parâmetros	VRQ	VP	VI		
			Agrícola	Residencial	Industrial
Arsênio	-	15	35	55	150
Bário	-	150	300	500	750
Chumbo	19	72	180	300	900
Cianeto	-	-	-	-	-
Cloreto	-	-	-	-	-
Cobre	13	60	200	400	600
Cromo	25	75	150	300	400
Manganês	-	-	-	-	-
Mercúrio	0,043	0,5	12	35	70
N – NH ₄ ⁺	-	-	-	-	-
Nitrato	-	-	-	-	-
Nitrito	-	-	-	-	-
N Total	-	-	-	-	-
Sódio	-	-	-	-	-
Zinco	31	300	450	1000	2000

O arsênio e o bário não têm um VRQ definido pelo órgão ambiental do estado, e nenhuma de suas amostras foi superior ao VP, de 15 mg.kg⁻¹ e 150 mg.kg⁻¹, respectivamente.

O chumbo apresentou apenas uma amostra no primeiro período de coleta com valor superior ao VRQ de 19 mg.kg⁻¹. A amostra apresentou uma concentração de 25,2 mg.kg⁻¹ na coleta de abril, representando um ponto de contaminação. Entretanto, na segunda coleta, em outubro, o mesmo ponto apresentou uma concentração de 10,4 mg.kg⁻¹, o que se enquadra nos valores de *background* para este parâmetro. Nenhuma amostra apresentou valor superior ao VP e VI.

Cianeto, cloreto, manganês, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, nitrato, nitrito e sódio são parâmetros que não possuem valores de referência de qualidade, de prevenção e nem de investigação definidos pela legislação vigente, e portanto, não puderam ser avaliados de acordo com esta.

O cobre apresentou 17 das 18 amostras coletadas em outubro com valores iguais ou superiores ao VRQ, de 13 mg.kg⁻¹. Estas 17 amostras variam de concentrações de 13 a 22 mg.kg⁻¹, e sua média é de 15,19 mg.kg⁻¹. Comparando estes valores com os da primeira coleta, observa-se um aumento significativo no parâmetro, já discutido no item anterior. Nenhuma das amostras apresentou valor superior ao VP ou VI.

O cromo apresenta três amostras no segundo período de coleta com concentrações superiores ao VRQ. Estas amostras representam pontos de contaminação, de acordo com o que foi apresentado no item anterior. Nenhuma amostra apresenta concentração superior aos valores de prevenção e investigação.

O VRQ estabelecido para o mercúrio é de 0,043 mg.kg⁻¹. Como este parâmetro apresentou-se inferior ao limite de detecção da técnica do laboratório (0,05) em todas as análises, não é possível avaliá-lo em relação à legislação.

Por fim, o zinco apresentou somente uma amostra superior ao VRQ no segundo período de coleta, muito embora todas representem fontes de contaminação, dado o aumento do parâmetro em relação à coleta de abril, conforme já discorrido no item anterior (7.2). Não há nenhuma amostra superior ao valor de prevenção ou investigação.

Dessa forma, observa-se que mesmo com a contaminação por diversos metais e elementos na área, suas concentrações são relativamente baixas, sendo que

apenas algumas poucas amostras apresentaram-se com concentrações superiores aos valores de referência de qualidade estabelecidos pela portaria FEPAM nº85/2014.

Nenhuma amostra em nenhum dos períodos apresentou concentração superior aos valores de prevenção ou investigação. Sendo assim, não há restrição de uso para os solos da área e nem risco à saúde humana.

7.4 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DADOS QUÍMICOS E AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO

As análises químicas das águas subterrâneas foram realizadas na área para as alíquotas total e dissolvida. Todos os poços de monitoramento instalados no local monitoram o nível freático do aquífero, portanto, as análises químicas são referentes ao aquífero freático local.

A alíquota total foi analisada com base em uma série de parâmetros, cujas concentrações serão apresentadas e discutidas na sequência.

Em relação à fração dissolvida, foram analisados somente os metais: alumínio, arsênio, chumbo, cromo trivalente, ferro, mercúrio, sódio e zinco, os quais também serão apresentados e discutidos a seguir.

Os parâmetros analisados sob a alíquota total serão abordados com seus correspondentes sob a alíquota dissolvida, de forma a fazer a distinção das concentrações registradas e suas interpretações. A maioria dos parâmetros analisados sob a alíquota total tiveram amostras coletadas somente nas áreas que se referem aos quadrantes 01 e 02 (item 4), que compreendem a área atual de operação do empreendimento.

Ressalta-se que não foram realizadas coletas nos poços PM 04, 13, 15, 17, 22 e 23 e 33 no ano destas análises, nem nos PMs 20 e 31 no início do ano.

A alíquota total analisou 36 parâmetros ao longo das campanhas de amostragem no ano de 2017. Dado o grande volume de dados, os elementos abordados e detalhados serão os principais constituintes das águas subterrâneas e os principais potenciais contaminantes identificados nas amostras do chorume.

Posteriormente, os parâmetros também serão enquadrados e avaliados conforme a resolução nº 396 de 2008 do CONAMA no item 7.5, que discorre sobre os valores máximos permitidos para diversos elementos considerando o uso das águas.

O **alumínio** é um constituinte natural das águas subterrâneas, que tipicamente ocorre a altas concentrações no aquífero freático, dado que é um elemento presente em minerais e argilas que estão em constante interação com as águas no freático.

Analisando os quatro períodos de coleta para a alíquota total, o alumínio apresentou-se com a menor concentração registrada, de 0,11 mg/L no período de novembro, no PM 12. Entretanto, neste poço, no período de abril, foi registrada a maior concentração de alumínio de todas as campanhas de amostragem, com um valor de 131 mg/L.

Tabela 8. Concentrações de alumínio total em mg/L, nos poços de monitoramento amostrados nas quatro campanhas de coleta ao longo de 2017.

PM	Alumínio Total (mg/L)			
	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	1,43	22,40	6,05	14,50
PM 02	1,47	40,60		2,42
PM 03		34,00		
PM 05	3,25	8,99	1,08	0,30
PM 06	24,40	2,07	17,80	5,50
PM 12	43,00	131,00	0,61	0,11
PM 07	9,51	1,98		1,32
PM 08	19,10	3,01		77,50
PM 09	5,45	19,60	4,77	6,90
PM 10	1,54	1,10	2,36	4,01
PM 11	3,29	4,27		5,15

Para a alíquota dissolvida, foram realizados seis períodos de coleta ao longo do ano. Destes, a menor concentração registrada foi no mês de dezembro, sendo que a maior foi de 0,709 mg/L no PM 16, em agosto (Tabela 9).

Tabela 9. Concentrações de alumínio dissolvido em mg/L nos seis períodos de amostragem em 2017.

PM	Alumínio Dissolvido (mg/L)					
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	dez/17
PM 16	0,132	0,455	0,25	0,709	0,145	0,09390
PM 18	0,15	0,0615			0,0849	0,02110
PM 19	0,35	0,235	0,0822	0,144	0,115	0,13100
PM 20						
PM 21	0,651			0,321		
PM 24	0,0251	0,119	0,0405		0,0106	0,00100
PM 25		0,216	0,0926	0,192	0,36	0,17100
PM 26	0,0239	0,172	0,0283	0,0677	0,0732	0,02120
PM 26 A	0,0054	0,001	0,00465		0,0393	0,00100
PM 26 B	0,00488	0,0307	0,00582	0,0105	0,0316	0,00328
PM 27	0,00561	0,0762	0,00845		0,0195	0,00162
PM 28	0,00473	0,0144	0,0111	0,144	0,128	0,01410
PM 29	0,0207	0,0892	0,0181		0,0354	0,02040
PM 30	0,00654	0,00207	0,00788	0,136	0,026	0,02070
PM 31						
PM 32	0,0178	0,00662	0,00888		0,0249	0,01040
PM 34	0,0103	0,0634	0,0135		0,0297	0,00438

O histograma da Figura 32 utiliza as amostras das quatro campanhas de amostragem para a alíquota total. Percebe-se que mais da metade das amostras enquadram-se nas concentrações de 0 a 5 mg/L e de 5 a 10 mg/L.

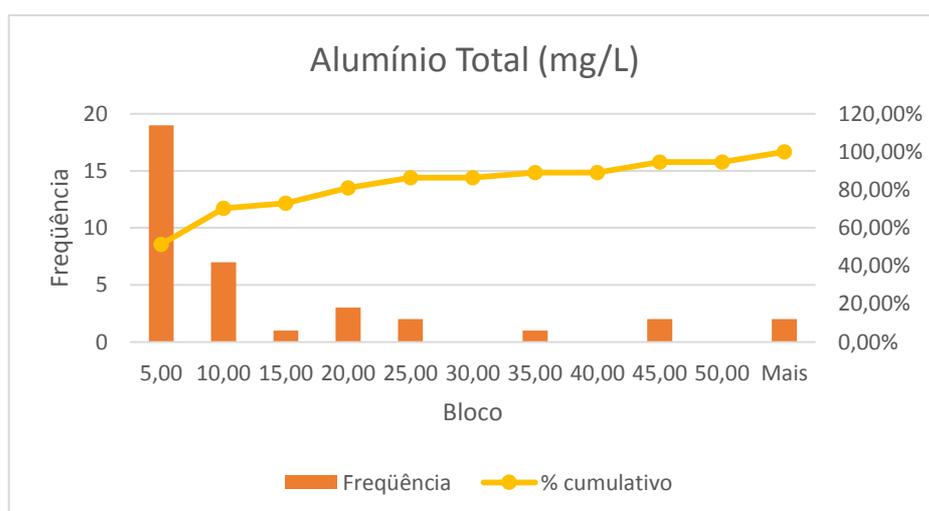


Figura 32. Histograma das amostras de alumínio total para as quatro campanhas de amostragem.

Já na Figura 33, o histograma apresentado trata da alíquota dissolvida do parâmetro alumínio, considerando os seis períodos de coleta realizados no ano.

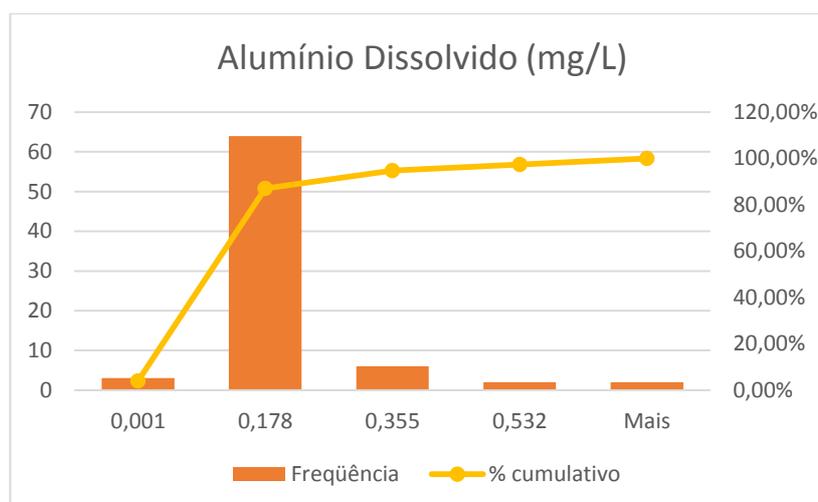


Figura 33. Histograma das concentrações de alumínio dissolvido, considerando as seis campanhas de amostragem.

O valor de investigação (VI) para este parâmetro estabelecido pela resolução do CONAMA nº 420 de 2009 é de 3,5 mg/L. Grande parte das amostras da alíquota total apresentaram-se superiores a este parâmetro, de forma que foram registradas concentrações de alumínio acima de 100 mg/L.

Entretanto, a alíquota total compreendo o alumínio que se encontra na fração suspensa da água e que fica retida em meio poroso. A fração em solução (alíquota dissolvida) é que é transportada na dinâmica do aquífero, oferecendo riscos de disseminação do contaminante.

Nenhuma das amostras da alíquota dissolvida apresentou valor superior ao VI de 3,5 mg/L. Estes baixos valores e a concentração da maioria das amostras em valores de até 0,178 mg/L sugerem que não ocorra contaminação por alumínio nas águas subterrâneas da área.

Apesar de ser um constituinte de diversos resíduos descartados na área, seus valores nas amostras de chorume também registraram valores baixos, de no máximo 1,58 mg/L.

O **arsênio** também foi analisado sob as alíquotas total e dissolvida. Para a alíquota total foram realizadas amostragens em períodos bimestrais, cujos resultados das análises químicas encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10. Concentrações de arsênio total em mg/L, para os quatro períodos de coleta realizados.

PMs	Arsênio total (mg/L)			
	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	0,0014	0,0081	0,0025	0,0065
PM 02	0,0020	0,0043		0,0025
PM 03		0,0272		
PM 05	0,0090	0,0077	0,0093	0,0206
PM 06	0,0045	0,0010	0,0015	0,0016
PM 12	0,0127	0,0349	0,0071	0,0038
PM 07	0,0052	0,0036		0,0025
PM 08	0,0712	0,0077		0,0134
PM 09	0,0020	0,0083	0,0033	0,0040
PM 10	0,0098	0,0052	0,0054	0,0047
PM 11	0,0603	0,0488		0,0115

Quanto à alíquota dissolvida, foram realizadas seis campanhas de amostragem ao longo do ano para os poços de monitoramento dos quadrantes 3,4 e 5. Os resultados das análises estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Concentrações de arsênio dissolvido nas águas subterrâneas da área, em mg/L, para as seis campanhas de amostragem.

PMs	Arsênio dissolvido (mg/L)					
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	dez/17
PM 16	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
PM 18	0,00224	0,00238			<0,001	<0,001
PM 19	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
PM 21	<0,001			<0,001		
PM 24	<0,001	0,00101	0,00231		0,00148	<0,001
PM 25	<0,001	0,00165	0,00282	0,00463	0,00157	<0,001
PM 26	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
PM 26 A	<0,001	<0,001	<0,001		0,001	<0,001
PM 26 B	0,00132	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
PM 27	<0,001	0,001	0,001		0,001	<0,001
PM 28	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
PM 29	0,0081	<0,001	0,00406		0,00521	<0,001
PM 30	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001
PM 32	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
PM 34	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001

Considerando que o VI para este parâmetro, de acordo com a resolução nº 420 de 2009, do CONAMA, é de 0,01, nove amostras analisadas sob a alíquota total apresentaram valor superior. O histograma das concentrações de arsênio total para as quatro campanhas de coleta, na Figura 34, indica que mais de 60% das amostras apresentaram valores entre 0 e 0,01, com um pequeno número de amostras ocorrendo em classes de concentrações superiores.

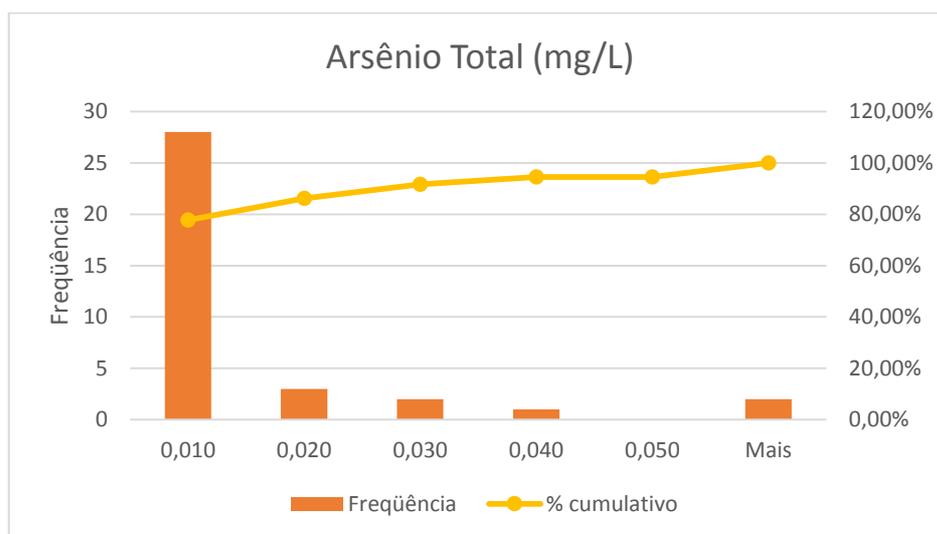


Figura 34. Histograma com as concentrações e classes de arsênio total, indicando que mais de 60% das amostras concentram-se na primeira classe.

Entretanto, nenhuma amostra analisada sob a alíquota dissolvida apresentou-se superior a esse valor, sendo que a maioria das amostras apresentou concentração inferior ao limite de detecção da técnica utilizada pelo laboratório. A presença de As na alíquota dissolvida em concentrações muito menores que na alíquota total indica que este contaminante encontra-se essencialmente na fração suspensa.

Sendo assim, o arsênio não representa um contaminante em potencial de acordo com as amostras de chorume (AUGUSTIN JR, 2011), reforçando que não há contaminação das águas subterrâneas por este elemento.

O **bário** é um elemento que ocorre naturalmente na água subterrânea, entretanto, também é utilizado nos processos industriais de curtumes e outros ramos da indústria. Seu monitoramento foi realizado sob as alíquotas total e dissolvida.

Na Tabela 12, são apresentados os resultados das análises químicas realizadas para as quatro coletas durante o ano de 2017, seguidas pelo histograma na Figura 35.

Observa-se que 05 (cinco) amostras coletadas apresentaram um valor superior ao VI deste parâmetro, que é de 0,07 mg/L. Destas 05 amostras, 03 são do mesmo poço – PM 08, que apresentou concentração crescente ao longo dos períodos de coleta.

O histograma gerado indica que mais da metade das amostras está concentrada nas primeiras classes do histograma, com concentrações de 0 a 0,4 mg/L.

Tabela 12. Concentrações de bário total nos poços de monitoramento amostrados para as quatro campanhas de coleta.

Bário Total (mg/L)				
PMs	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	0,03	0,42	0,23	0,35
PM 02	0,17	0,58		0,28
PM 03		1,48		
PM 05	0,40	0,37	0,36	0,55
PM 06	0,15	0,06	0,16	0,08
PM 12	0,42	0,81	0,33	0,09
PM 07	0,34	0,22		0,25
PM 08	1,13	1,36		1,83
PM 09	0,11	0,26	0,17	0,28
PM 10	0,13	0,08	0,17	0,21
PM 11	0,21	0,11		0,09

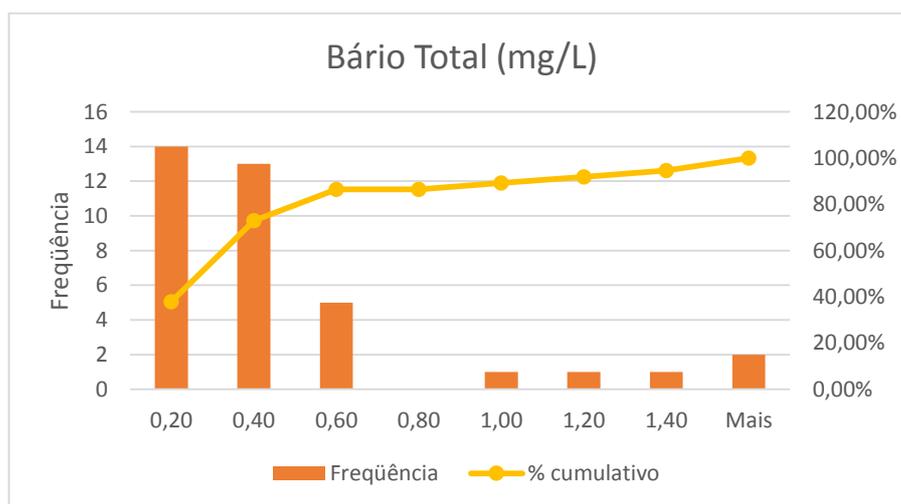


Figura 35. Histograma com as concentrações de bário total, com mais da metade das amostras concentradas nas primeiras classes, que representam concentrações de 0 a 0,2 mg/L e 0,2 a 0,4 mg/L.

O bário também foi analisado sob a alíquota dissolvida, com coletas realizadas em 6 meses do ano e nos quadrantes 03, 04 e 05. As concentrações obtidas através das análises químicas para esta alíquota estão indicadas na Tabela 13.

Tabela 13. Concentrações de bário dissolvido nos PMs dos quadrantes 03, 04 e 05 para os 06 meses em que ocorreu amostragem.

PM	Bário dissolvido (mg/L)					
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	dez/17
PM 16	0,66	1,36	0,84	1,55	0,447	0,3410
PM 18	0,0851	0,238			0,095	0,0993
PM 19	0,0943	0,047	0,112	0,0778	0,0968	0,0660
PM 20						
PM 21	0,156			0,0848		
PM 24	0,0608	0,0538	0,0794		0,1	0,0330
PM 25	0,0579	0,124	0,235	0,179	0,0746	0,0761
PM 26	0,0261	0,0437	0,0206	0,0169	0,0139	0,0134
PM 26 A	0,0337	0,0289	0,042		0,0429	0,0348
PM 26 B	0,538	0,521	0,399	0,608	0,75	0,4450
PM 27	0,108	0,125	0,0755		0,108	0,0754
PM 28	0,0679	0,0212	0,0502	0,0516	0,0672	0,0329
PM 29	0,025	0,0262	0,0262		0,0223	0,0187
PM 30	0,139	0,124	0,118	0,127	0,124	0,0718
PM 31						
PM 32	0,0239	0,0232	0,0226		0,0178	0,0177
PM 34	0,00889	0,0146	0,0338		0,0196	0,0297

Analisando a tabela acima, observa-se que sob a alíquota dissolvida, a concentração de bário foi superior ao VI no PM 16, em abril, junho e agosto; e no PM 26B, em outubro.

Foi gerado um histograma com as concentrações de bário dissolvido, representado na Figura 36, utilizando os resultados dos seis meses em que ocorreu a amostragem para análise deste parâmetro.

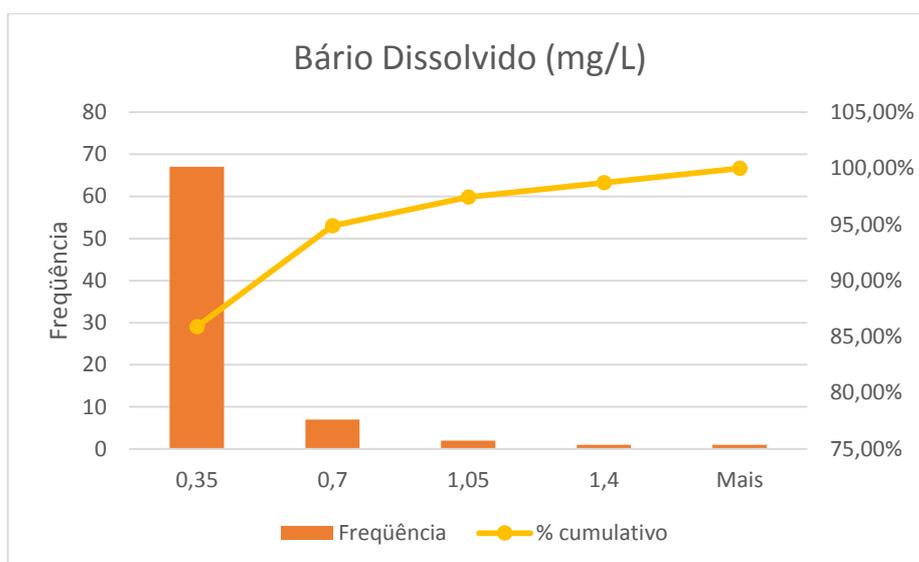


Figura 36. Histograma com as concentrações de bário dissolvido considerando as seis campanhas de amostragem.

Observa-se que 85% das amostras enquadram-se na primeira classe, com concentrações de até 0,35 mg/L. A alíquota total também apresentou percentagem semelhante de suas amostras (histograma da Figura 35) concentradas em classes de 0 a 0,2 mg/L e 0,2 a 0,4 mg/L.

Este dado indica que provavelmente o bário encontra-se majoritariamente sob a forma dissolvida, e que os valores superiores a 0,5 representem fontes de contaminação por este parâmetro. A contaminação por este parâmetro é reforçada através das análises do chorume, que apesar de ocorrer em baixas concentrações, o parâmetro foi registrado nas três amostras (item 4).

Os valores de pH medidos em todos os poços de monitoramento do empreendimento variaram de 4,4 a 7,6, sendo que a média é de 6. O potencial redox, que também foi medido, apresentou valores na faixa de -0,1 a 0,4V. Considerando estes dados, a Figura 37 demonstra que, nesta faixa de valores, a especiação do bário ocorre essencialmente como Ba^{2+} , reforçando que suas concentrações similares nas duas alíquotas reforçam que este elemento esteja sob a forma dissolvida, e que não ocorre precipitação nem adsorção do elemento neste contexto.

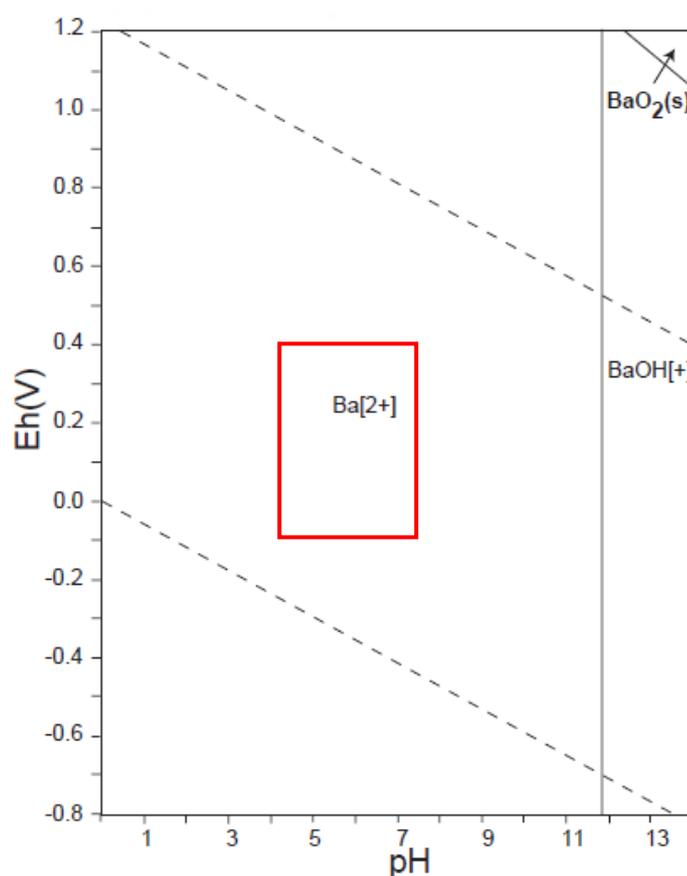


Figura 37. Especiação do bário para a faixa de valores de Eh e pH. Considerando os valores medidos em campo, observa-se que o bário ocorre principalmente na forma dissolvida como Ba²⁺, o que explica suas concentrações similares nas alíquotas total e dissolvida. Fonte: Takeno (2005).

O **chumbo** é um elemento presente em tinturas e outros processos industriais, inclusive no ramo dos couros e calçados. Este elemento foi analisado sob as alíquotas total e dissolvida. Na Tabela 14 constam os resultados para a alíquota total, considerando que foram realizadas coletas em fevereiro, abril, agosto e novembro de 2017. Logo em seguida, a Figura 38 resume estes dados em forma de um histograma de frequências.

Tabela 14. Concentrações de chumbo total, em mg/L, para os quatro meses de coleta.

PMs	Chumbo total (mg/L)			
	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	0,016	0,199	0,112	0,171
PM 02	0,064	0,388		0,122
PM 03		0,319		
PM 05	0,013	0,025	0,009	0,027
PM 06	0,050	0,006	0,062	0,023
PM 12	0,062	0,154	0,003	0,004
PM 07	0,086	0,057		0,056
PM 08	0,059	0,015		0,416
PM 09	0,005	0,017	0,008	0,012
PM 10	0,010	0,004	0,009	0,013
PM 11	0,003	0,003		0,006

Considerando o VI de 0,01 para este parâmetro, somente 11 amostras do total analisado ocorrem em valor inferior ao estabelecido. O valor máximo registrado foi de 0,416 mg/L no PM 08, de forma que a distribuição de classes e frequências pode ser observada Figura 38.

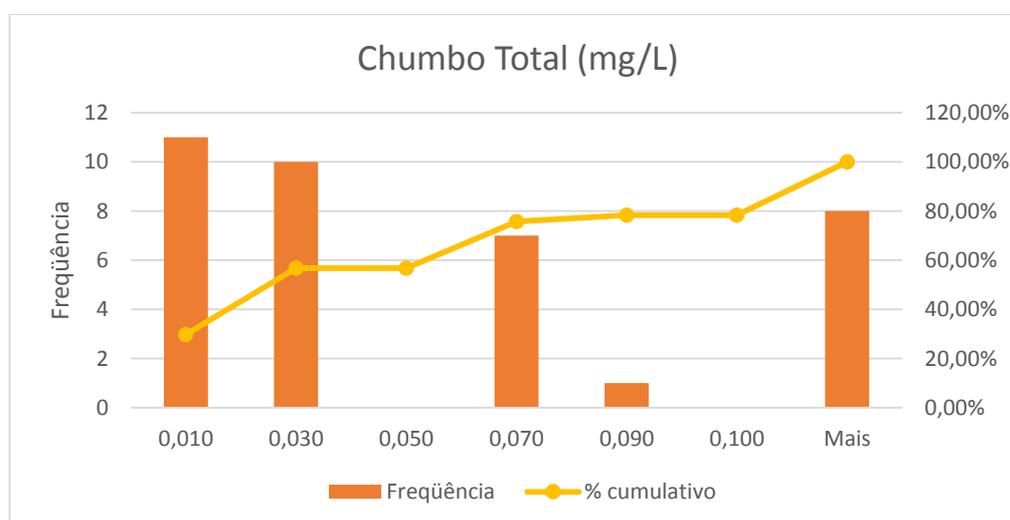


Figura 38. Histograma com as concentrações de chumbo total, considerando os quatro períodos de coleta.

Considerando que a alíquota total pode conter elementos em suspensão, utilizou-se a alíquota dissolvida para a avaliação da contaminação sob este parâmetro.

Tabela 15. Concentrações de chumbo dissolvido em mg/L nos poços dos quadrantes 03, 04 e 05, considerando seis campanhas de amostragem.

PM	Chumbo dissolvido (mg/L)					
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	dez/17
PM 16	<0,001	0,00116	<0,001	0,00237	<0,001	<0,00100
PM 18	<0,001	<0,001			<0,001	<0,00100
PM 19	<0,001	<0,001	<0,001	0,00101	<0,001	0,00116
PM 20						
PM 21	<0,001			<0,001		
PM 24	<0,001	<0,001	<0,001		<<0,001	0,00100
PM 25	0,00228	<0,001	0,00103	0,0037	0,00217	0,00235
PM 26	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,00100
PM 26 A	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,00100
PM 26 B	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,00100
PM 27	<0,001	<0,001	<0,001		0,00105	<0,00100
PM 28	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,00100
PM 29	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,00100
PM 30	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01310
PM 31						
PM 32	<0,001	0,0014	0,00114		0,00101	0,00101
PM 34	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,00100

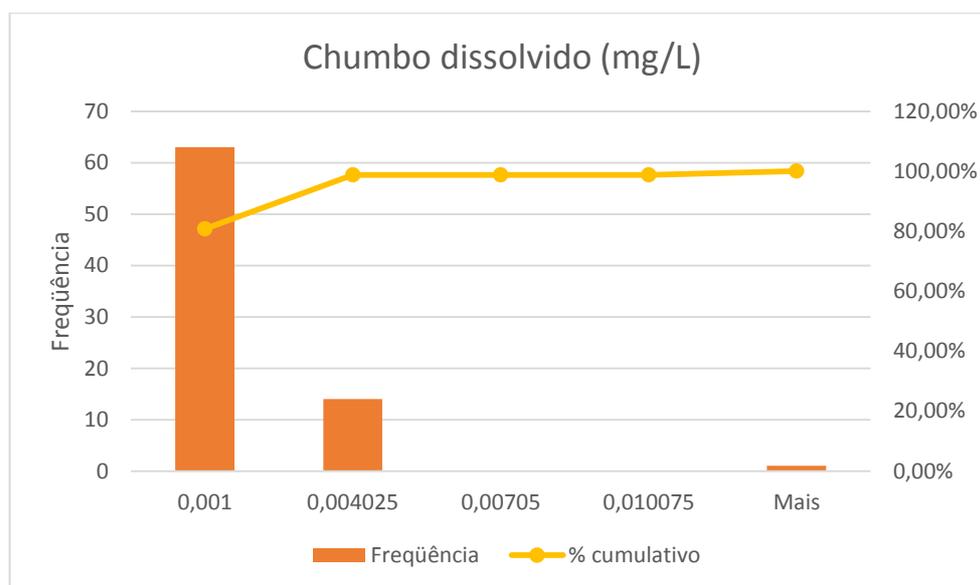


Figura 39. Concentrações de chumbo dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05, considerando os seis meses de amostragem.

A partir da análise da tabela que mostra as concentrações de chumbo dissolvido, observa-se que apenas o PM 30 apresentou concentração de 0,013 mg/L,

praticamente igual ao VI. Os PMs que registraram uma concentração de 0,001 mg/L na verdade, apresentam uma concentração inferior ao limite de detecção da técnica de laboratório utilizada.

Apesar do valor registrado para o PM 30, o mesmo está inserido na porção que corresponde a área de ampliação, ou seja, em um ambiente onde não ocorre a disposição nem influência de resíduos. Sendo assim, o valor representa uma concentração natural de chumbo nas águas subterrâneas, indicando que não há contaminação sob a alíquota dissolvida para este parâmetro.

O **cromo trivalente** foi analisado sob a forma total, em todos os quadrantes do empreendimento, e sob a forma dissolvida, nos quadrantes 03, 04 e 05. Nestes quadrantes, o monitoramento e coleta ocorreu em 06 meses do ano, sendo que para os quadrantes 01 e 02, a coleta foi realizada em 04 meses.

Tabela 16. Cromo total em mg/L nos poços de monitoramento amostrados em todos os quadrantes da área.

PM	Cromo Total (mg/L)						
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	nov/17	dez/17
PM 01	0,00726	0,0915		0,0236		0,0618	
PM 02	0,011	0,0614				0,0107	
PM 03		0,0872					
PM 05	0,0683	0,0251		0,059		0,329	
PM 06	0,0388	0,00952		0,0381		0,0265	
PM 12	0,574	0,96		0,205		0,0202	
PM 07	0,0442	0,0123				0,00849	
PM 08	0,972	0,034				0,397	
PM 09	0,00619	0,0189		0,00694		0,00739	
PM 10	0,0102	0,00563		0,00457		0,00724	
PM 11	0,0189	0,0215				0,0126	
PM 16	0,0062	0,00137	0,0318	0,0118	0,0247		0,010
PM 18	1,29	0,127					0,283
PM 19	0,0994	0,0519	0,00901	0,0278	0,0173		0,029
PM 21	<0,001						
PM 24	0,138	0,306	0,143		0,333		0,199
PM 25	0,0929	0,0256	0,0212	0,0308	0,0273		0,030
PM 26	0,00217	0,00283	0,00479	0,00439	0,00265		<0,001
PM 26 A	0,0012	<0,0010	<0,001		0,0018		<0,0010
PM 26 B	<0,001	0,00168	<0,001	0,00313	0,00331		<0,001
PM 27	0,0287	0,137	0,016		0,0249		0,202
PM 28	<0,001	<0,001	<0,001	0,00445	0,00225		<0,001
PM 29	0,00152	0,00275	0,00176		0,00391		0,006
PM 30	0,00125	<0,001	<0,001	0,00463	0,00264		<0,001
PM 32	<0,001	<0,001	<0,001		0,00138		<0,001
PM 34	<0,001	0,00171	0,00124		0,00194		<0,001

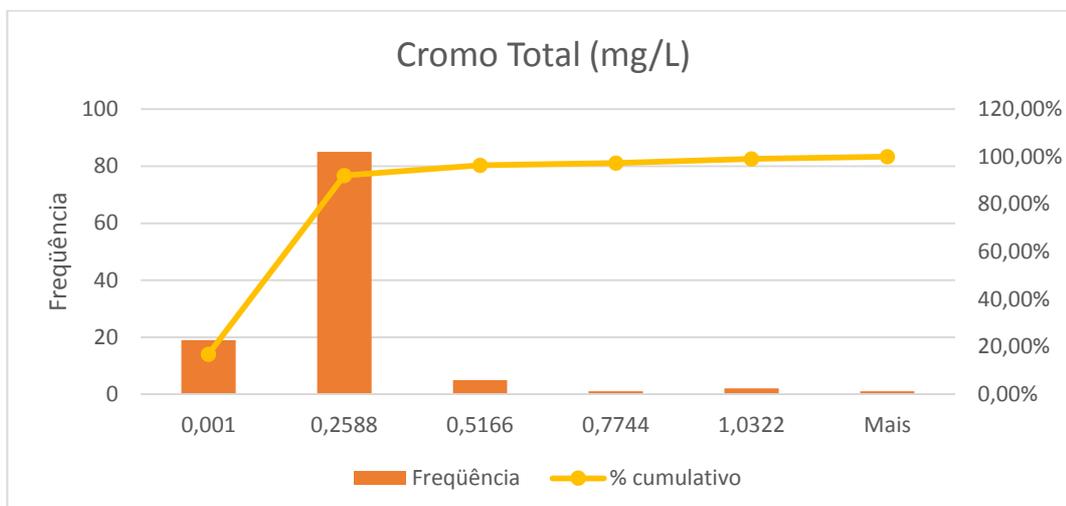


Figura 40. Histograma com a distribuição das concentrações de cromo total para as amostras analisadas nos quatro períodos de coleta.

A partir da análise da alíquota total, observa-se que foram registradas concentrações superiores ao VI de 0,01 mg/L deste parâmetro nos quadrantes 01, 02 e 04, em diversos poços de monitoramento.

O cromo dissolvido foi analisado para os quadrantes 01 e 02 em apenas um mês (novembro) no ano de 2017. Os quadrantes 03 e 05 foram monitorados em 5 meses no ano, e o quadrante 04, em 06 meses.

Tabela 17. Concentrações de cromo dissolvido em mg/L ao longo do período monitorado em 2017.

PM	Cromo Dissolvido (mg/L)						
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	nov/17	dez/17
PM 01						<0,001	
PM 02						0,0023	
PM 03							
PM 05						0,161	
PM 06						0,00456	
PM 12						0,00838	
PM 07						<0,001	
PM 08						0,0138	
PM 09						0,00258	
PM 10						0,00329	
PM 11						0,00134	
PM 16	<0,001	<0,001		<0,001	0,00212		<0,0010
PM 18	0,00641	0,0126			0,00469		0,0019
PM 19	0,0033	<0,001	0,00217	0,00274	0,00468		0,0013
PM 20							
PM 21	<0,001			0,00153			
PM 24	0,0107	0,0112	0,041		0,0187		0,0034
PM 25	0,014	0,00889	0,0125	0,0185	0,016		0,0096
PM 26	<0,001	<0,001	0,0036	0,00134	0,00155		<0,0010
PM 26 A	<0,001	<0,001	0,001		0,0013		<0,0010
PM 26 B	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	0,00218		<0,0010
PM 27	0,00761	0,00649	0,00517		0,00556		0,0032
PM 28	<0,001	<0,001		0,004	0,002		<0,0010
PM 29	<0,001	<0,001			0,00138		<0,0010
PM 30	<0,001	<0,001		0,00415	0,0014		<0,0010
PM 31							
PM 32	<0,001	<0,001			<0,001		<0,0010
PM 34	<0,001	<0,001			0,00147		<0,0010

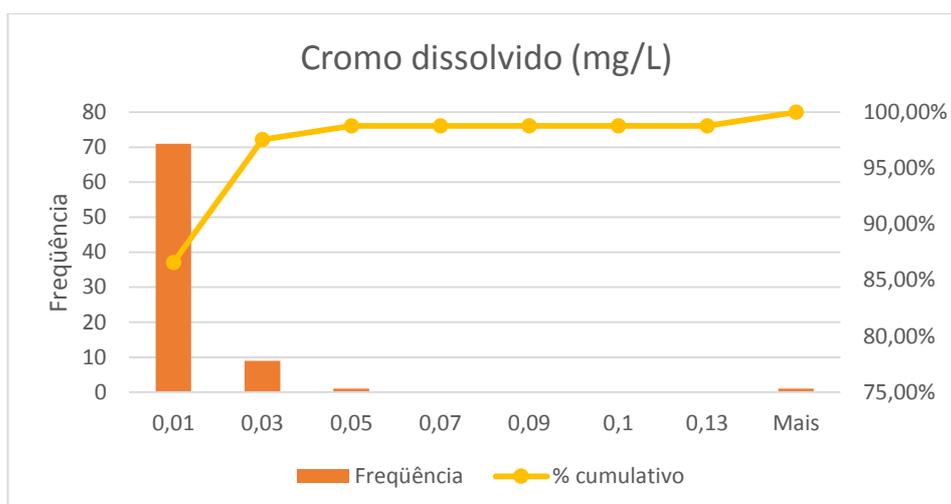


Figura 41. Histograma das concentrações de cromo dissolvido para todos os quadrantes, ao longo de todo período de amostragem.

Os dados do histograma acima indicam que praticamente todas as amostras ocorrem em concentrações de até 0,03 mg/L de cromo dissolvido. Duas amostras excedem estes valores, ocorrendo em concentrações de 0,041 e 0,161 mg/L, e ocorrem nos PMs 24 (quadrante 4) e PM 05 (quadrante 01), respectivamente.

Estas amostras indicam pontos de contaminação por cromo de baixa intensidade na alíquota dissolvida, de forma que apenas a amostra do PM 05 excede o valor de investigação proposto pela resolução nº 420 de 2009, do CONAMA, de 0,05 mg/L.

O **ferro**, assim como o alumínio, é um elemento comum nas águas de aquíferos freáticos, dada a sua presença comum nos minerais do solo que estão em constante interação com estas águas. Nas análises mineralógicas realizadas e também na difração de raios x, constatou-se a presença de minerais como magnetita, limonita, hematita, turmalina, e concreções férricas, que apresentam ferro em sua estrutura que pode ser liberado quando ocorre o intemperismo. A alíquota total registrou concentrações relativamente altas para este parâmetro, conforme pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 18. Concentrações de ferro total para os PMs dos quadrantes 01 e 02, cujas coletas foram realizadas em quatro meses no ano de 2017.

PMs	Ferro Total (mg/L)			
	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	2,12	33,4	14,6	22,7
PM 02	2,57	31,8		2,98
PM 03		<0,001		
PM 05	39	53,1	44,3	66,5
PM 06	20	1,82	11,3	4,26
PM 12	69,5	174	5,98	9,15
PM 07	17	7,59		5,01
PM 08	79	11,4		69,9
PM 09	1,78	12,4	3,55	2,8
PM 10	11,4	10,4	11,9	6,36
PM 11	18	16,5		5,77

A menor concentração registrada para este parâmetro, sob a alíquota total, foi de 1,78 mg/L no PM 01, entretanto, esta concentração é relativa ao período de fevereiro, sendo registrado um valor de 2,8 mg/L no período de novembro correspondente ao mesmo PM. A maior concentração foi de 79 mg/L, no PM 12, relativa ao período de fevereiro, diminuindo para 69,9 mg/L em novembro. As altas concentrações provavelmente devem-se ao fato do ferro encontrar-se em suspensão.

Os valores de pH medidos em todos os poços de monitoramento do empreendimento variaram de 4,4 a 7,6, sendo que a média é de 6. O potencial redox, que também foi medido, apresentou valores na faixa de -0,1 a 0,4V. Considerando estes dados, a Figura 43 demonstra que, nesta faixa de valores, a especiação do ferro ocorre como Fe_2O_3 e como Fe^{2+} , reforçando que suas altas concentrações na fração total se justificam pela ocorrência de ferro em suspensão e adsorvido.

Considerando que a fração mais preocupante compreende o material dissolvido, que é transportado com a dinâmica do aquífero, o ferro também foi analisado sob a alíquota dissolvida para fins de avaliação da contaminação.

A Tabela 19 mostra os resultados das análises que foram realizadas nos poços de monitoramento dos quadrantes 03, 04 e 05 na área, monitorados por 6 meses em 2017.

Tabela 19. Concentrações de ferro dissolvido nas amostras coletadas nos PMs correspondentes aos quadrantes 03, 04 e 05, ao longo de seis campanhas de amostragem.

PM	Ferro Dissolvido (mg/L)					
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	dez/17
PM 16	0,0688	0,923	0,0535	<0,001	<0,001	<0,0010
PM 18	3,74	12,3			0,015	6,2800
PM 19	0,319	1,13	3,07	0,135	0,313	0,4440
PM 20						
PM 21	0,0793			<0,001		
PM 24	6,31	7,23	13,8		4,86	1,4100
PM 25	1,05	6,03	1,35	0,736	0,641	0,8040
PM 26	0,147	1,76	0,0407	<0,001	<0,001	0,0347
PM 26 A	0,0528	<0,001	0,0173		<0,001	0,0403
PM 26 B	0,388	0,21	0,0399	<0,001	<0,001	<0,0010
PM 27	0,0948	4,7	0,0391		<0,001	0,1760
PM 28	0,108	0,001	0,024	<0,001	<0,001	0,0580
PM 29	5,29	0,0503	1,65		3,12	3,0500
PM 30	0,0205	<0,001	0,0291	0,00168	<0,001	1,3900
PM 31						
PM 32	0,295	0,00208	0,032		<0,001	0,4380
PM 34	0,0342	0,0237	0,0232		<0,001	2,0000

Diante destes valores observa-se que o ferro ocorre tanto em concentrações baixas, inferiores ao limite de detecção da técnica até valores superiores a 10 mg/L. O histograma da Figura 42 contempla as concentrações de ferro dissolvido, englobando as amostras dos 6 períodos de coleta.

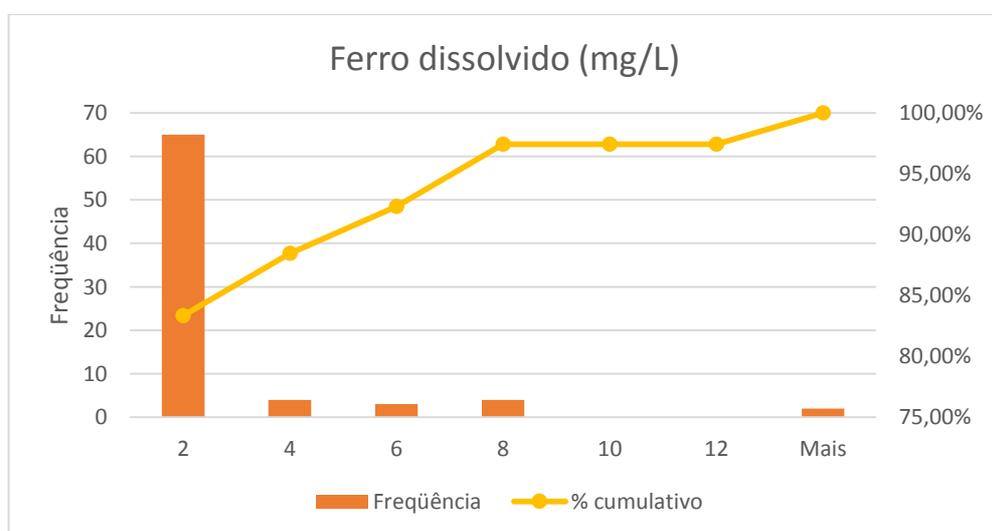


Figura 42. Histograma contendo as concentrações de ferro dissolvido na área dos quadrantes 03, 04 e 05, para os seis meses de monitoramento.

Apesar das altas concentrações de ferro estarem associadas ao *background* geológico do local, observa-se que mais de 80% das amostras ocorrem em concentrações de até 2 mg/L de ferro. O valor de investigação estabelecido pela resolução nº 420 de 2009 do CONAMA, para este parâmetro é de 2,45 mg/L. Este dado indica que, em janeiro, 03 amostras apresentaram valor superior ao VI; em abril, 04 amostras; em junho, 02 amostras; em outubro, 02 amostras; em novembro, 01 amostras. Em agosto, nenhuma amostra apresentou valor superior ao VI.

Além disso, é possível observar que no quadrante 05, a maior concentração registrada foi de 5,29 mg/L de ferro dissolvido. Como neste local não há disposição nem influência de resíduos, visto que trata da área pretendida para ampliação do empreendimento, o valor não se associa com contaminação antrópica.

Sendo assim, com base na análise da frequência das amostras do histograma apresentado e considerando o *background* local alto, adotou-se uma concentração superior a 6 mg/L para pontos contaminados, dado que o ferro está presente nas amostras de chorume e representa um contaminante em potencial.

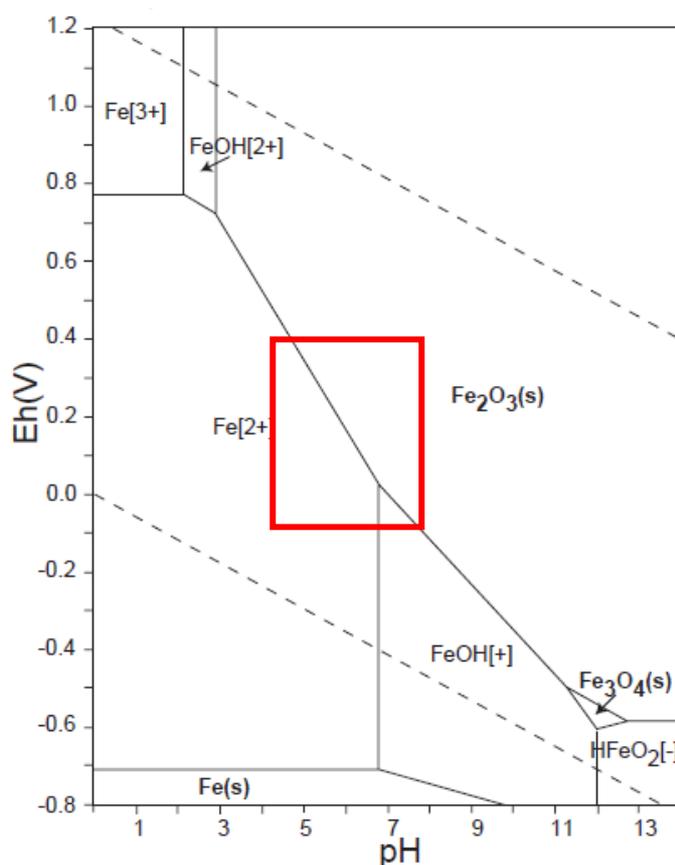


Figura 43. Especiação do ferro para a faixa de valores de Eh e pH. Considerando os valores medidos em campo, observa-se que o ferro ocorre na forma de Fe₂O₃ e também como Fe²⁺ o que justifica sua ocorrência em altas concentrações na alíquota total. Fonte: Takeno (2005).

O **mercúrio** foi analisado sob a alíquota total e dissolvida. Na alíquota dissolvida foram coletadas amostras nos quadrantes 03, 04 e 05 ao longo de 6 meses em 2017. Ressalta-se que em todos os poços amostrados sob esta alíquota estiveram abaixo do limite de detecção da técnica e portanto, a tabela com os resultados não será apresentada.

Em relação a alíquota total, foram realizadas quatro coletas ao longo de 2017 nos quadrantes 01 e 02, de forma que os resultados estão registrados na Tabela 20.

Tabela 20. Concentrações de mercúrio total nos poços de monitoramento dos quadrantes 01 e 02 para os quatro períodos de amostragem.

Mercúrio Total (mg/L)				
PM	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PM 02	<0,0001	<0,0001		<0,0001
PM 03		<0,0001		
PM 05	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PM 06	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PM 12	<0,0001	0,00134	0,000107	<0,0001
PM 07	<0,0001	<0,0001		<0,0001
PM 08	0,00163	<0,0001		0,000394
PM 09	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PM 10	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
PM 11	<0,0001	<0,0001		<0,0001

O mercúrio não é um constituinte natural das águas subterrâneas e é um elemento extremamente tóxico para o ser humano. Na maioria dos PMs amostrados, as concentrações de mercúrio apresentaram-se inferiores ao limite de detecção da técnica. Entretanto, no PM 08 foram registradas concentrações de mercúrio em fevereiro e novembro, e no PM 12 em abril e agosto.

A resolução do CONAMA nº 420 de 2009 estabelece o VI de 0,001 para este parâmetro. Como é possível observar, as referidas amostras apresentaram uma concentração de ordem de grandeza semelhante à estabelecida pelo VI. O mercúrio é utilizado nos processos industriais de curtumes e também em outros processos que envolvem pigmentação. O elemento foi registrado em uma das amostras de chorume (item 4) o que confirma seu potencial contaminante. Sendo assim, há dois pontos de

contaminação de mercúrio, sendo que o PM 08 registrou contaminação apenas no mês de fevereiro, e o PM 12 em abril e agosto.

O **sódio** foi analisado sob a alíquota total e dissolvida. Para a alíquota total, os resultados são expressos na Tabela 21. O sódio está presente nas águas subterrâneas em concentrações que variam com as condições geológicas do local. As concentrações registradas na tabela abaixo apresentam até 1233 mg/L de sódio.

Tabela 21. Concentração de sódio total nos quadrantes 01 e 02 ao longo de 2017, em quatro campanhas de amostragem.

Sódio Total (mg/L)	
PM	nov/17
PM 01	6,95
PM 02	35,6
PM 03	
PM 05	156
PM 06	7,22
PM 12	64
PM 07	7,12
PM 08	1233
PM 09	309
PM 10	10,5
PM 11	219

A análise do sódio sob a alíquota dissolvida foi realizada em 6 meses no ano de 2017 e nos poços de monitoramento inseridos nos quadrantes 03, 04 e 05. Os resultados encontram-se na Tabela 22, seguido pelo histograma de frequência dos dados na Figura 44.

Tabela 22. Concentração de sódio dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 ao longo de seis meses de amostragem.

PM	Sódio Dissolvido (mg/L)					
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	dez/17
PM 16	6,6	22,3	13,4	32,8	7,58	7,5
PM 18	7,44	43,5			1,07	4,38
PM 19	5,79	2,82	2,01	2,87	1,66	1,47
PM 20						
PM 21	1,39			1,84		
PM 24	12,4	21,9	36,4		27,7	12,8
PM 25	110	515	705	543	341	213
PM 26	8,11	9,8	7,41	9,38	5,16	6,39
PM 26 A	9,76	11	11,7		11	10,7
PM 26 B	25,6	26,2	22	31,3	29,6	19,9
PM 27	19,9	42,9	19,7		25,8	20,4
PM 28	2,13	1,22	1,84	2,41	2,93	2,15
PM 29	1,64	2,13	2,04		1,37	
PM 30	2,61	3,04	3,03	3,67	2,96	2,6
PM 31						
PM 32	3,59	3,93	3,71		2,43	2,76
PM 34	3,05	1,07	1,47		0,924	1,39

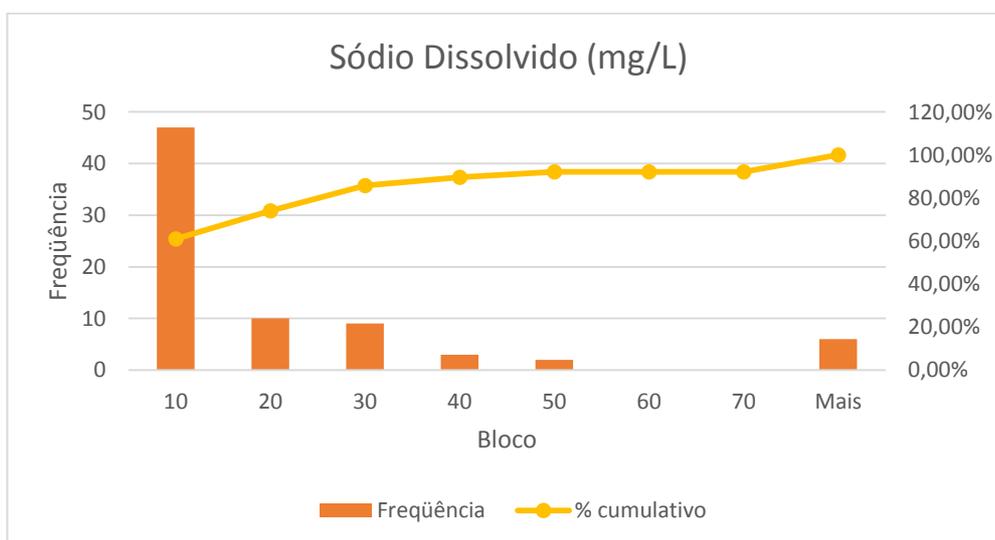


Figura 44. Histograma com as concentrações de sódio dissolvido considerando as amostras dos 06 meses de coleta.

O histograma indica que quase metade das amostras de sódio ocorrem em concentrações de até 10 mg/L. Comparando o histograma proposto por Augustin Jr (2011), este valor corresponde ao limite para o *background* geológico do local,

tratando amostras com concentrações superiores como pontos de contaminação antrópica.

O sódio ocorre em todas amostras de chorume a concentrações de até 260 mg/L, comprovando seu potencial contaminante.

Sendo assim, considerou-se que as amostras com valores acima de 10 mg/L representam pontos de contaminação.

Portanto, há contaminação por 05 amostras de sódio referentes ao período de dezembro nos PMs 24, 25, 26A, 26B, e 27, em concentrações que variam de 10,7 a 213 mg/L.

Ressalta-se que outros PMs apresentaram concentrações superiores ao valor de 10 mg/L em alguns dos meses de coleta, mas que o valor foi inferior no período de dezembro.

Em relação a alíquota total, 7 amostras apresentaram-se superior ao valor de 10 mg/L para o período de novembro.

A análise do **zinco** se deu sob a forma total e dissolvida. Apesar de ser amplamente utilizado em processos industriais, o zinco também é um constituinte natural das águas subterrâneas e essencial para o ser humano. Este elemento não foi analisado nas amostras de chorume coletadas por Augustin Jr (2011), portanto, não se conhece o potencial contaminante do elemento para a área.

Sob a alíquota total, o zinco foi coletado ao longo de quatro meses em 2017, nos poços de monitoramento dos quadrantes 01 e 02, e os resultados estão indicados na Tabela 23.

Nenhuma das amostras apresentou valor superior ao VI proposto pela resolução nº 420 de 2009, do CONAMA, fixado em 1,05 mg/L.

Tabela 23. Concentrações de zinco total para os quadrantes 01 e 02 ao longo dos quatro meses de amostragem.

PM	Zinco Total (mg/L)			
	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	0,0146	0,191	0,115	0,163
PM 02	0,172	0,547		0,357
PM 03		0,113		
PM 05	0,0645	0,148	0,0443	0,0685
PM 06	0,0152	0,0275	0,0695	0,0277
PM 12	0,347	0,919	0,00804	0,109
PM 07	0,0604	0,0519		0,0217
PM 08	0,207	0,0465		0,211
PM 09	0,102	0,117	0,108	0,14
PM 10	0,0155	0,0313	0,0694	0,0984
PM 11	0,00362	0,0161		0,00792

O zinco dissolvido foi analisado nos poços de monitoramento pertencentes às áreas dos quadrantes 03, 04 e 05, ao longo de seis períodos de coleta. Da mesma forma que a alíquota total, nenhum valor excedeu o VI proposto pela resolução do CONAMA (*op cit*). Os valores resultantes desta alíquota encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24. Concentrações de zinco dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05, considerando seis períodos de coleta em 2017.

PM	Zinco dissolvido (mg/L)					
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	dez/17
PM 16	0,0143	0,0229	0,023	0,0244	0,0348	0,00732
PM 18	0,0163	0,0346			0,037	0,00934
PM 19	0,0255	0,037	0,0085	0,0641	0,139	0,03330
PM 20						
PM 21	0,0107			0,0477		
PM 24	0,00149	0,00714	0,0157		0,0412	0,01280
PM 25	0,0374	0,0169	0,0131	0,031	0,0105	0,02130
PM 26	0,0246	0,0182	0,0141	0,00932	0,0149	0,00557
PM 26 A	<0,001	0,00147	0,00415		0,0304	<0,00100
PM 26 B	0,00403	0,0133	0,0499	0,0257	0,0477	0,00966
PM 27	0,00533	0,0231	0,0261		0,0622	0,01400
PM 28	<0,001	0,00139	0,00872	0,0115	0,0129	0,00597
PM 29	0,0084	0,0158	0,00577		0,034	0,00207
PM 30	0,017	0,0386	0,0517	0,167	0,072	0,02130
PM 31						
PM 32	0,00486	0,0161	0,0151		0,00955	0,00762
PM 34	0,0118	0,0194	0,0124		0,0172	0,00802

Considerando que no quadrante 05 (PM 28 ao PM 34) não há descarte nem influência de resíduos industriais, tratando-se da área de ampliação do empreendimento, as concentrações de zinco nas águas subterrâneas são naturais. Portanto, foram gerados dois histogramas, um para os quadrantes 03 e 04 e outro para o quadrante 05, para fins de comparação das concentrações de zinco nas águas.

Na Figura 45 é apresentado o histograma correspondente aos quadrantes 03 e 04, enquanto na Figura 46 apresenta-se o histograma do quadrante 05, onde não há descarte de resíduos industriais.

A distribuição das frequências nos dois histogramas é praticamente a mesma para cada classe, sendo que as pequenas variações podem estar relacionadas ao maior número de amostras dos quadrantes 03 e 04 em relação ao quadrante 05. Essa distribuição reforça a ideia da ocorrência natural do zinco nas águas subterrâneas, não representando uma fonte de contaminação antrópica.

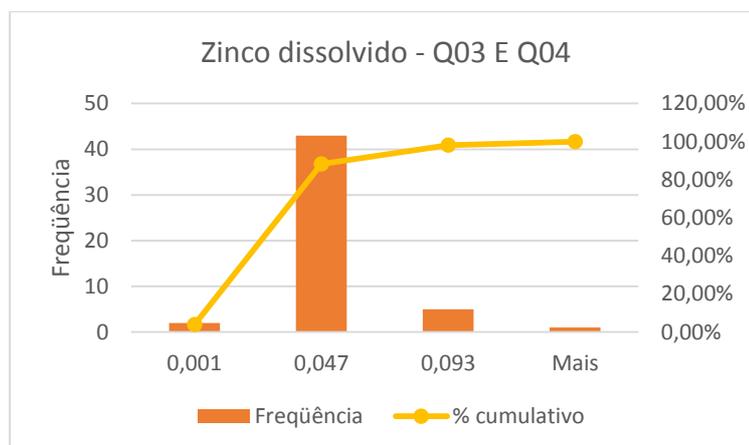


Figura 45. Zinco dissolvido nos quadrantes 03 e 04, considerando as amostras dos seis meses de coleta.



Figura 46. Zinco dissolvido no quadrante 05, onde não há descarte de resíduos, considerando as amostras dos seis meses de coleta.

Os próximos elementos a serem abordados foram analisados apenas sob a alíquota **total**, e na área dos quadrantes 01 e 02.

A análise do **manganês** se deu sob a forma total. Este elemento é um constituinte natural das águas subterrâneas e não representa uma fonte de contaminação antrópica.

O manganês apresentou concentrações superiores aos valores de referência propostos na legislação ambiental em diversos poços de monitoramento, apresentando concentração máxima de 6,71 mg/L no PM 03, no mês de abril.

Considerando que o manganês é um constituinte natural dos solos e das águas subterrâneas, estes altos valores justificam-se pela sua ocorrência em suspensão nas águas subterrâneas.

O **boro** é um constituinte natural das águas subterrâneas e não foi analisado nas amostras de chorume. Nenhum dos valores analisados excedeu o VI de 1,05 mg/L, de forma que o maior valor registrado foi de 0,9 mg/L. As baixas concentrações registradas provavelmente não representam uma fonte de contaminação para as águas subterrâneas.

O **antimônio** não foi detectado nas amostras de chorume, de modo que apesar da ocorrência de concentrações na mesma ordem de grandeza do VI, de 0,005 mg/L, não representa fonte de contaminação antrópica.

Cromo hexavalente, cádmio e cianetos apresentaram-se com valor igual ou inferior ao limite de detecção da técnica em todos os poços de monitoramento analisados.

O **cloreto** representa um dos principais potenciais contaminantes identificados nas amostras de chorume, relatadas no item 4. Apesar de ser um constituinte natural das águas subterrâneas, o cloreto também é comum em diversos processos industriais, inclusive aqueles relacionados às atividades de curtumes.

O cloreto foi analisado em todos os quadrantes do empreendimento, de forma que: nos quadrantes 01 e 02 a análise ocorreu em quatro meses no ano; nos quadrantes 03 e 04, em cinco meses; e no quadrante 05, em seis meses. As concentrações de cada poço analisado e seu respectivo período são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25. Concentrações de cloreto nos poços de monitoramento de todo o empreendimento e seu respectivo período de análise.

PM	Cloreto (mg/L)						
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	nov/17	dez/17
PM 01	1,1	1,6		<1		1,6	
PM 02	43,3	56,8				37,8	
PM 03		15,3					
PM 05	181	158		137		133	
PM 06	5,5			6,5		14	
PM 12				444		37,4	
PM 07	6,1	31,3				5,1	
PM 08		404				140	
PM 09	236	317		380		345	
PM 10	4,6	4,2		7,6		3,1	
PM 11		2190				221	
PM 16	36,1	290	49,5	142	41,5		
PM 19	1,58	5,3	1,99	4	3		
PM 24	32,3	38,6	51,8		42,7		
PM 25	89,9		502		354		
PM 26	<1	1,2	1,1	<1	<1		
PM 26 A	4,5	4,5	9,3		7,4		
PM 26 B	61,3	69,9	57	87,5	89,6		
PM 27	20,7	42,6	19,3		16,5		
PM 28	2,2	2,2	2,2	2,3	2,4		10,5
PM 29	1,6	2,3	1,7		1,5		1,8
PM 30	2,3	2,5	2,4	4,2	2,5		2,6
PM 32	2,4	2,7	2,1		2,5		2,1
PM 34	1,6	1,8	1,7		1,9		2

Na área de ampliação do empreendimento, correspondente ao quadrante 05 (PM 28 ao PM 34) observa-se a ocorrência de uma concentração máxima de 10,5 mg/L de cloreto, sendo que a média de todo período analisado é de 2,5 mg/L. Os valores identificados neste quadrante representam ocorrência natural do elemento, visto que não há descarte nem influência de resíduos nesta área, como já comentado.

Entretanto, algumas das concentrações identificadas nos demais quadrantes excedem estes valores de forma considerável. A distribuição das frequências e concentrações de cloreto pode ser observada no histograma da Figura 47, que foi construído considerando todos os poços de monitoramento e todos os períodos de análise.

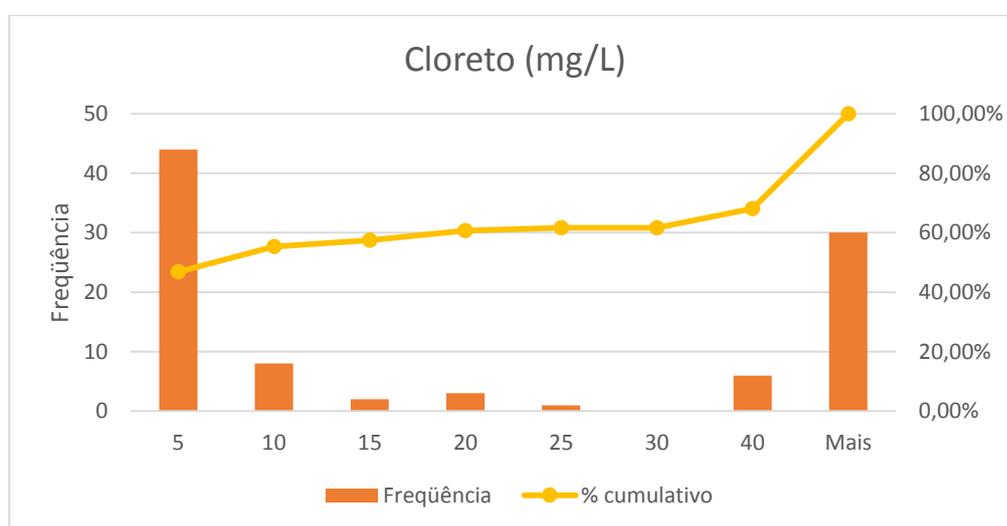


Figura 47. Histograma com as concentrações de cloreto considerando todos os poços de monitoramento e todos períodos de amostragem.

Observa-se que uma grande parte das amostras apresenta concentrações de até 5 mg/L e uma porção menor em até 10 mg/L, que representa as concentrações naturais, de acordo com o que foi registrado para o quadrante 05.

Sendo assim, considerou-se que as amostras dos quadrantes 01, 02, 03 e 04 que apresentaram valores superiores a 10 mg/L decorrem de contaminação antrópica.

Com exceção do PM 01, a contaminação por cloretos foi identificada em todos os poços inseridos no quadrante 01, em concentrações que variaram de 14 a 181 mg/L.

No quadrante 02, o PM 07 registrou um valor de 31,3 mg/L de cloreto em abril, mas que caiu para 5,1 mg/L em novembro. Os PMs 08, 09 e 11, também no quadrante 02, registraram concentrações decorrentes de contaminação ao longo do período

analisado, que variaram de um mínimo de 140 mg/L (novembro – PM 08) de cloreto até um máximo de 2190 mg/L (abril – PM 11).

No quadrante 03, constituído apenas pelo PM 16, as concentrações de cloreto indicaram contaminação ao longo de todo período de análise, em concentrações que variaram de 36,1 mg/L a 290 mg/L.

No quadrante 04, a contaminação por cloretos foi registrada nos PMs 25, 26, 26B e 27 em todos os períodos analisados.

O **nitrito** ocorre em concentrações que variam de 0,3 mg/L a 23,7 mg/L (Tabela 26), sendo que seu VI segundo a resolução nº 420 de 2009 do CONAMA é de 1000 mg/L. Inúmeras publicações apresentam concentrações naturais de nitrito nas águas subterrâneas de até 12 mg/L (AESRD, 2011; DEJWAKH, 2006; MCMAHON e BOHLKE, 2006, ROISENBERG *et al.*, 2003; MUELLER e HELSEL, 2002). Com isso, pode-se atribuir à contaminação decorrente do aterro de resíduos as concentrações maiores que 12 mg/L, registradas em 04 poços, e à origem natural as demais. Já o **nitrito** ocorreu em concentrações inferiores ou semelhantes ao limite de detecção da técnica de laboratório e não representa uma fonte de contaminação.

Tabela 26. Concentrações de nitrato nos poços de monitoramento de todo o empreendimento e seu respectivo período de análise.

PM	Nitrato (mg/L)						
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	nov/17	dez/17
PM 01	1,89	1,73		0,5		1,09	
PM 02	9	13,2				10,3	
PM 03		1,76					
PM 05	0,87	0,98		0,58		0,94	
PM 06	2,68			2,23		2,18	
PM 12	2,01	1,49				0,54	
PM 07	4	5,37				6,71	
PM 08	0,82	0,3				13,1	
PM 09	10,6	3,21		16,2		15	
PM 10	8,2	13,2		14,3		23,7	
PM 11	2,52	1,55				3,11	
PM 16	3,47		5,48	0,58	3,36		1,24
PM 18							0,95
PM 19	1,72	1,57	0,6	0,86	1,07		3,30
PM 20							
PM 21							
PM 24	0,3	1,92	0,3		1,49		3,60
PM 25	9,4		1,27		4,24		1,28
PM 26	0,34	0,37		0,3	0,61		0,68
PM 26 A	9	0,3			0,3		0,43
PM 26 B	0,33	0,3	0,55	0,75	0,55		0,64
PM 27	2,48	1,66	1,12		3,01		1,68
PM 28	0,85	0,52	0,86	1,28	1,38		1,02
PM 29	1,33	1,59	0,3		0,36		1,05
PM 30	2,89	2,4	1,13	1,4	1,49		1,01
PM 31							
PM 32	1,51	0,74	1,08		0,93		0,86
PM 34	0,5	0,96	0,85		0,3		0,30

O **sulfato** é um componente natural das águas subterrâneas. Entretanto, também é um elemento comumente utilizado em processos industriais, inclusive nos processos de curtimento do couro, e sua ocorrência em uma das amostras de chorume analisadas (item 4) comprova seu potencial contaminante às águas subterrâneas.

O sulfato foi analisado em todos os quadrantes do empreendimento, cuja periodicidade de coleta variou conforme o quadrante analisado. A Tabela 27 mostra o

resultado das concentrações em cada poço de monitoramento para cada período de coleta.

Tabela 27. Concentrações de sulfato, em mg/L, para os poços de monitoramento amostrados ao longo do ano nos quadrantes 01, 02, 03, 04 e 05.

PM	Sulfato (mg/L)						
	fev/17	abr/17	jun/17	ago/17	out/17	nov/17	dez/17
PM 01	<5	<5		<5		<5	
PM 02	25	5,98				12,9	
PM 03		16,7					
PM 05	30,9	26,3		25,2		<5	
PM 06	<5			<5		<5	
PM 12						<5	
PM 07	5	12,9				<5	
PM 08		8,51				25,6	
PM 09	152	96,7		166		139	
PM 10	5,2	44		46,8		<5	
PM 11		<5				<5	
PM 16	<5				<5		<5
PM 18							
PM 19	4,62	8,25	<5	9,81	8,08		<5
PM 20							
PM 21							
PM 24	7,84	<5	<5		27,5		12,5
PM 25	16,3	<5	<5				
PM 26	35,3	<5	<5	<5	22,1		<5
PM 26 A	5,5	<5	<5		<5		<5
PM 26 B	6,7	50,9	<5	<5	<5		<5
PM 27	52,4	<5	39,6		48,5		<5
PM 28	5,4	<5	<5	<5	<5		<5
PM 29	10,8	<5	<5		<5		<5
PM 30	26	6,59	6,59	8	<5		<5
PM 31							
PM 32	22,9	<5	<5		<5		<5
PM 34	23,5	<5	<5		<5		<5

Considerando que há ocorrência do sulfato é natural nas águas subterrâneas, e que na área correspondente ao quadrante 05 não há descarte de resíduos nem qualquer tipo de atividade relacionada à operação do empreendimento, as concentrações de sulfato são naturais. Salienta-se que nesta área as concentrações

de sulfato apresentaram até 26 mg/L no primeiro período de amostragem, e no último todas as amostras apresentaram valor inferior ao limite de detecção da técnica.

Nos demais quadrantes as concentrações de sulfato também apresentaram variações ao longo dos períodos de amostragem. Em novembro, os PMs 02, 08 e 09 (quadrantes 01 e 02) registraram concentrações de 12,9 mg/L a 139 mg/L e representam pontos de contaminação. Em dezembro, o PM 24 apresentou concentração de 12,5 mg/L de sulfato, de forma que também representa fonte de contaminação antrópica. Outros poços apresentaram concentrações elevadas nos primeiros períodos de amostragem do ano, indicativas de contaminação, mas no último mês reduziram-se ao limite de detecção da técnica, como é o caso dos PMs 05, 07, 10, 26, 26B e 27.

O **níquel**, apesar de estar presente nos processos industriais dos curtumes, é um elemento que não foi detectado nas amostras de chorume no ano de sua realização. Krieger (2000) registrou a presença de níquel a uma concentração de 0,018 mg/L (alíquota dissolvida no PM 03). Os valores em 2017 sob a alíquota total apresentaram-se bastante superiores aos monitorados por Geoprospec (2015). O VI proposto pela resolução nº420 de 2009, do CONAMA, é de 0,02 mg/L para este parâmetro. A Tabela 28 mostra que 09 amostras ao longo do período monitorado apresentaram valor superior, nos PMs 01, 03, 12 e 08.

Tabela 28. Concentração de níquel nos quadrantes 01 e 02 ao longo de quatro meses de amostragem.

PM	Níquel Total (mg/L)			
	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	0,0027	0,0406	0,0167	0,0294
PM 02	0,00636	0,0111		0,00654
PM 03		0,0391		
PM 05	0,0101	0,00992	0,013	0,0198
PM 06	0,0053	0,00413	0,00652	0,00411
PM 12	0,0292	0,0666	0,0274	0,00165
PM 07	0,00709	0,00768		0,00421
PM 08	0,261	0,0312		0,0464
PM 09	0,0182	0,0192	0,0159	0,0184
PM 10	0,00979	0,00862	0,0105	0,0177
PM 11	0,00641	0,00849		0,00129

Diante destes valores, é necessária uma nova amostragem do chorume e também uma análise deste parâmetro sob a alíquota dissolvida a fim de identificar uma eventual contaminação antrópica.

Os parâmetros **sulfeto**, **tálio**, **fosfato**, **selênio**, **prata** e **molibdênio** ocorrem em concentrações muito baixas, na maioria das amostras inferiores ao limite de detecção da própria técnica e não representam fontes de contaminação.

O **magnésio** não ocorre nas amostras de chorume (AUGUSTIN JR, 2011), cujos resultados estão indicados no item 4. Este parâmetro foi amostrado nos quadrantes 01 e 02, e suas concentrações variam de 0,403 mg/L a 129 mg/L, conforme Tabela 29. Não há valor de intervenção proposta pela resolução nº 420 de 2009, do CONAMA, para este parâmetro.

Tabela 29. Concentração de magnésio total nos quadrantes 01 e 02 ao longo dos períodos de amostragem em 2017.

PM	Magnésio Total (mg/L)			
	fev/17	abr/17	ago/17	nov/17
PM 01	0,403	4,05	2,18	3,67
PM 02	3,79	7,04		5
PM 03		9,69		
PM 05	15,3	13,4	17,6	34,2
PM 06	3,16	6,68	3,89	5,5
PM 12	51,5	129	73,8	23
PM 07	1,88	2,68		2,1
PM 08	20,7	17,2		14,4
PM 09	10,2	9,83	17,3	26,6
PM 10	4,31	5,82	8,43	10,9
PM 11	51,2	66,1		18,4

7.5 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM RELAÇÃO À LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

Cada parâmetro amostrado e analisado nos poços de monitoramento da área foi avaliado em relação a legislação ambiental vigente, de acordo com os valores propostos pela resolução nº 396 de 2008 do CONAMA.

A norma dispõe sobre os valores máximos permitidos de cada parâmetro para consumo humano, dessedentação animal, irrigação e recreação.

O **alumínio**, quando analisado sob a alíquota total, nos quadrantes 01 e 02, excedeu o limite de 0,2 mg/L em quase todas as amostras e em todos os períodos (com exceção do PM 12 no período de novembro). Além disso, 5 PMs em fevereiro, 07 PMs em abril, 04 PMs em agosto e 06 PMs em novembro excederam os valores máximos permitidos para irrigação e dessedentação animal. Em relação a alíquota dissolvida, analisada nos quadrantes 03, 04 e 05, o alumínio não excedeu o valor máximo permitido para consumo humano.

Os valores de alumínio total apresentaram-se com valores muito elevados, superiores aos limites propostos pela resolução nº 398 de 2008 do CONAMA na maioria das amostras, visto que este parâmetro se encontra em suspensão e que é de ocorrência comum no aquífero freático. A relação das concentrações de alumínio nos poços de monitoramento para os períodos de análise é apresentada sob forma de gráfico na Figura 48, para a alíquota total, e na Figura 49 para a alíquota dissolvida.

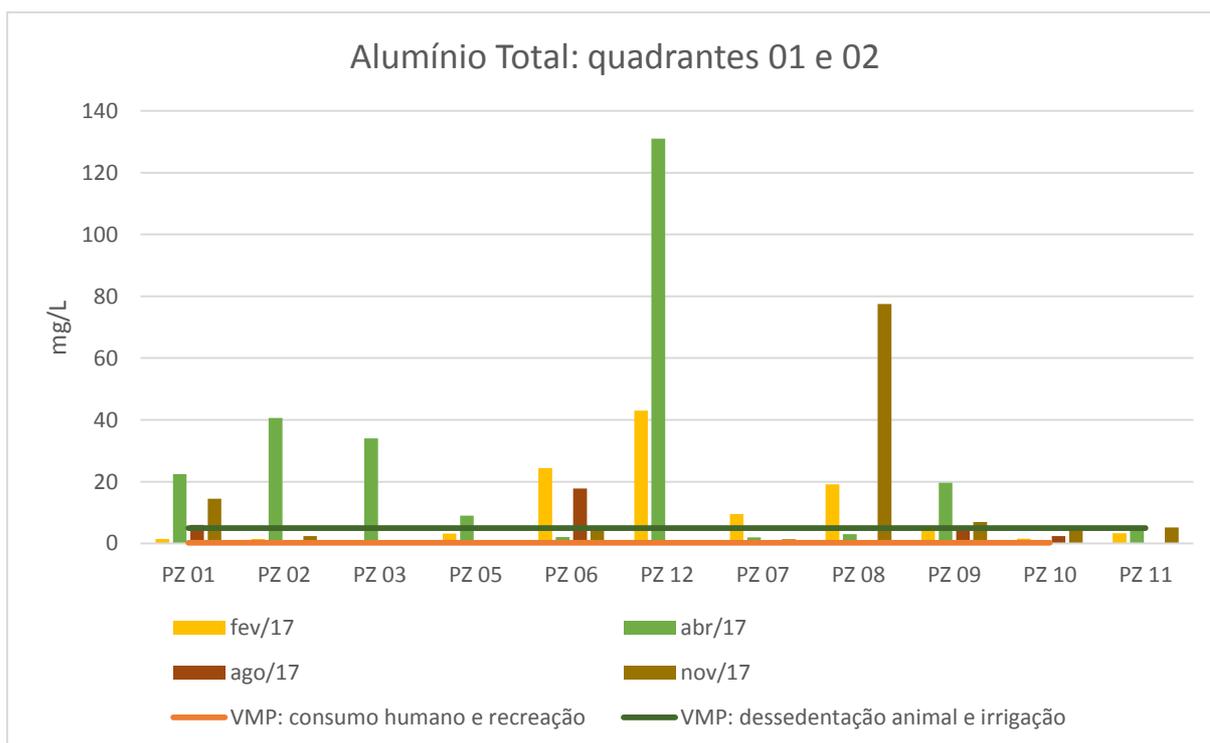


Figura 48. Concentrações de alumínio total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela resolução nº 396 de 2008 (CONAMA).

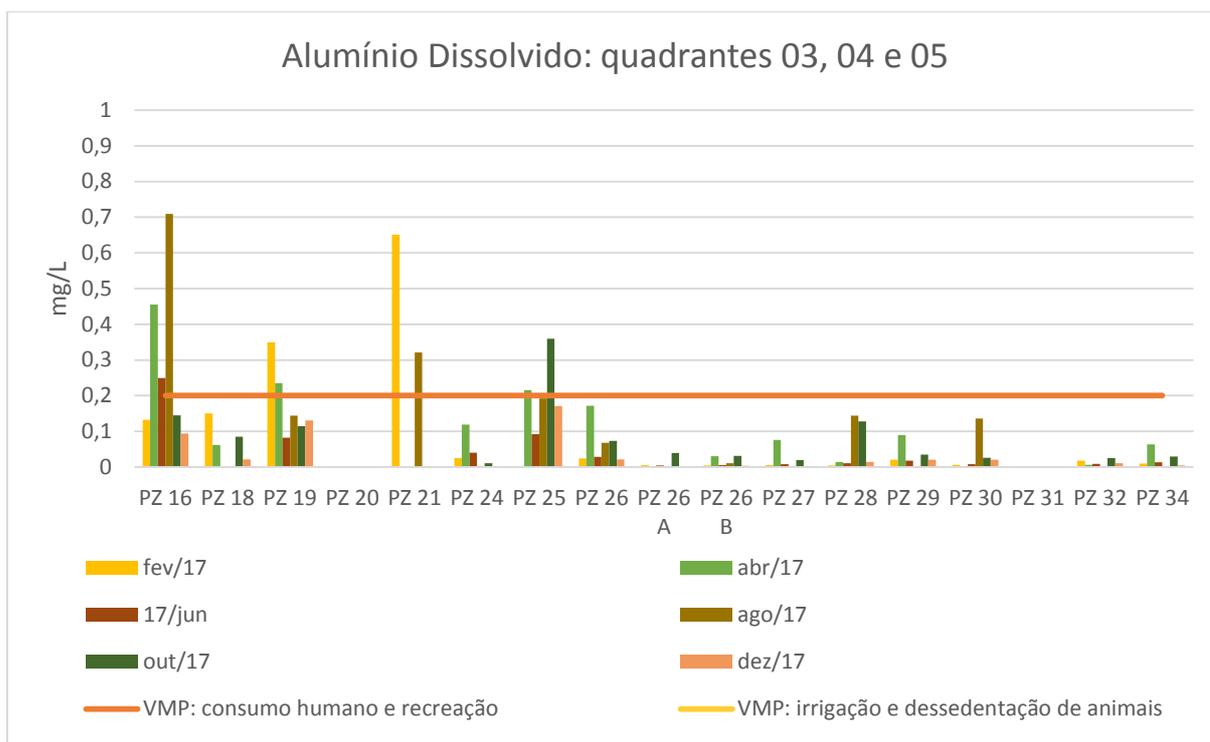


Figura 49. Concentrações de alumínio dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela resolução nº 396 de 2008 (CONAMA). O VMP para irrigação e dessedentação de animais é de 5 mg/L, e não foi plotado no gráfico pelo fato nenhum poço exceder esta concentração.

O **arsênio** sob a alíquota total (quadrantes 01 e 02) foi apresentado valores superiores ao valor máximo permitido para consumo humano (0,01 mg/L) em fevereiro (03 poços), abril (02 poços) e novembro (03 poços).

Além disso, os poços PM 08 e PM 11, no mês de fevereiro, apresentaram valor superior ao VMP estabelecido para recreação, de 0,05 mg/L. Nenhum valor excedeu o VMP para dessedentação de animais, fixado em 0,2 mg/L. Os poços de monitoramento que excederam estas concentrações estão indicados no gráfico da Figura 50.

O arsênio sob a alíquota dissolvida, analisado nos quadrantes 03, 04 e 05, não excede nenhum dos valores propostos na resolução, e portanto, a água pode ser destinada a todos os usos quanto à este parâmetro. O gráfico com as concentrações de arsênio dissolvido em relação ao valor máximo permitido para consumo humano é apresentado na Figura 51.

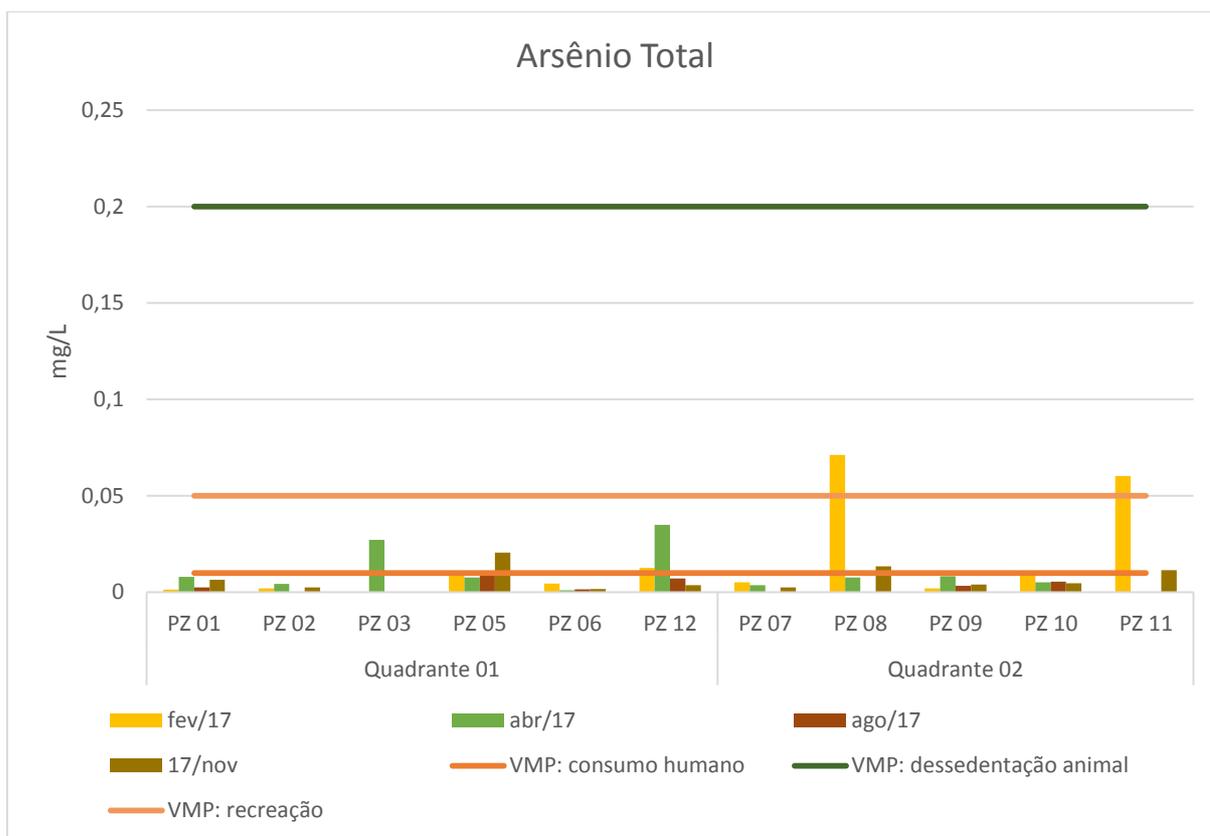


Figura 50. Concentração de arsênio total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.

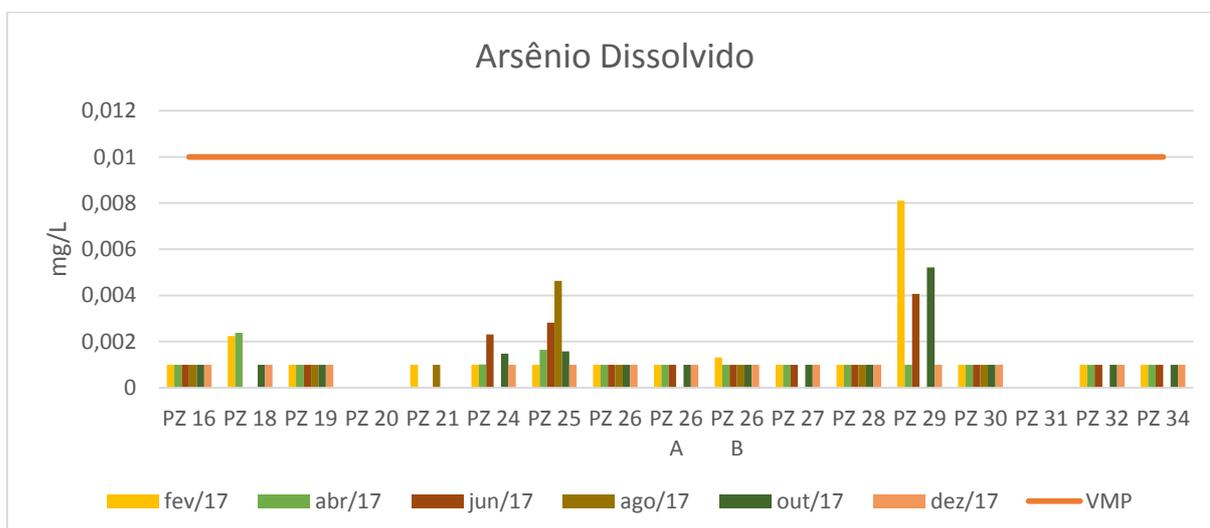


Figura 51. Concentrações de arsênio dissolvido em relação ao valor máximo permitido para consumo humano em relação à legislação vigente. O parâmetro não excede o valor de 0,01 mg/L do VMP em nenhum poço.

O **bário**, sob a alíquota total (quadrantes 01 e 02) excedeu o valor máximo permitido para consumo humano em 01 amostra em fevereiro e novembro, e em 03 amostras em abril. As amostras de fevereiro, novembro, e também duas das amostras

de abril excederam o valor máximo permitido para recreação, fixado em 1 mg/L pela legislação. Não há VMP estipulado para dessedentação animal para este parâmetro. A relação dos poços que apresentaram concentração superior é apresentada no gráfico da Figura 52.

Na análise da alíquota dissolvida, nos quadrantes 03, 04 e 05, o PM 16 no quadrante 03 excedeu os valores máximos para consumo humano e recreação nos meses de abril, junho e agosto. No quadrante 04, o PM 26 B excedeu o valor máximo para consumo humano no mês de outubro, apenas. Os poços que apresentaram valores acima do valor máximo permitido pela legislação podem ser observados no gráfico da Figura 53.

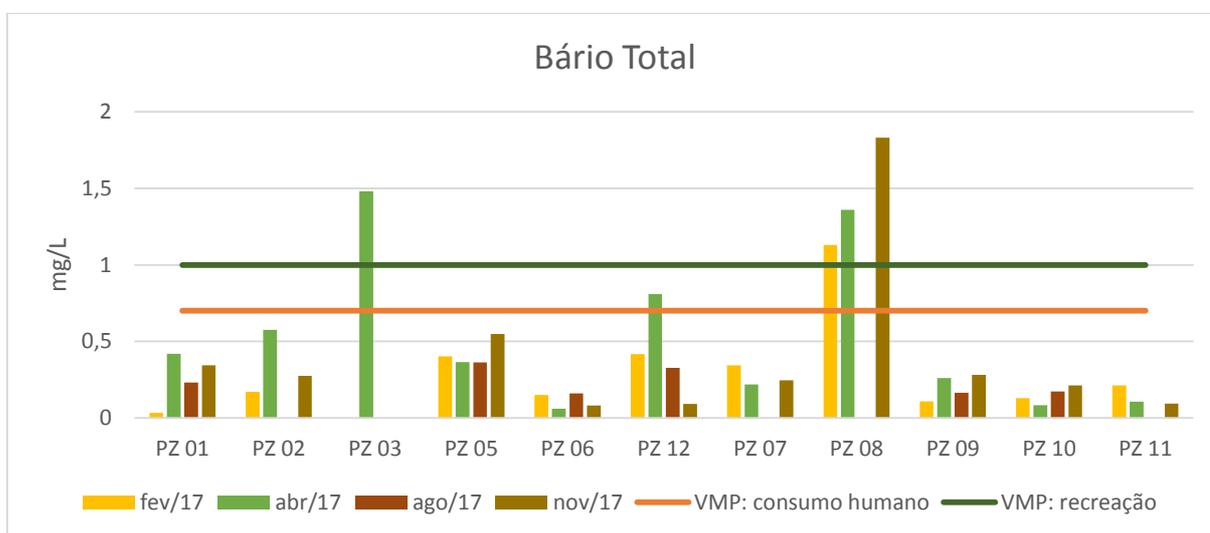


Figura 52. Concentrações de bário total em relação aos valores máximos permitidos pela legislação vigente.

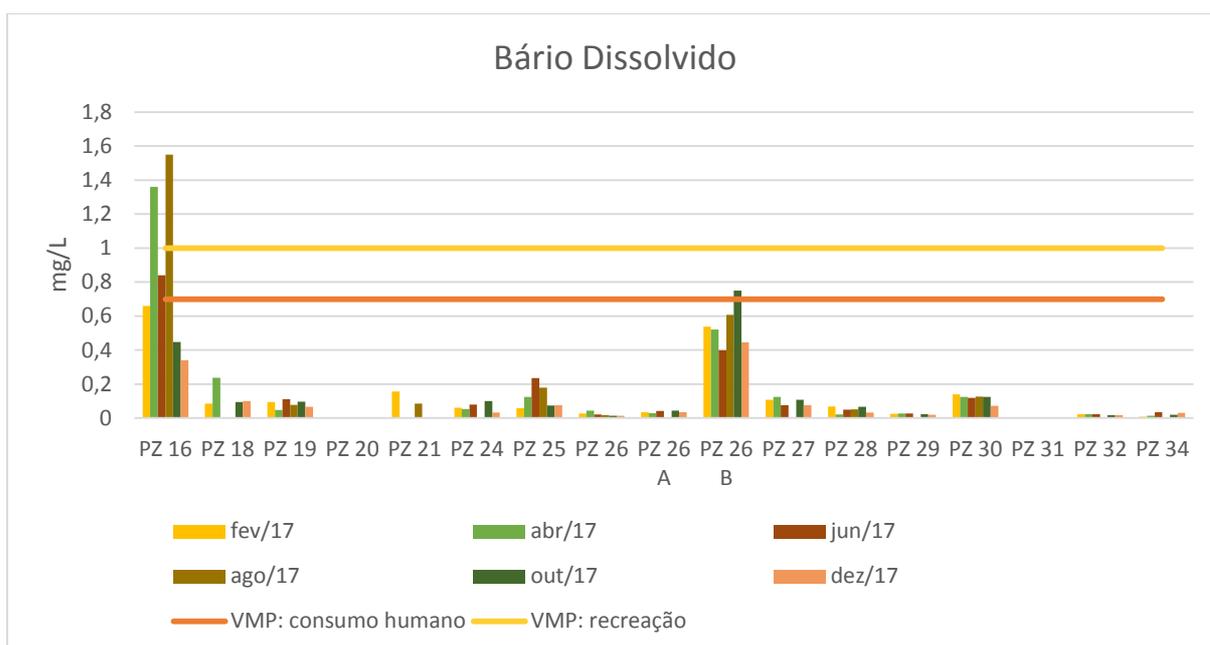


Figura 53. Concentrações de bário dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.

O **chumbo total**, analisado nos quadrantes 01 e 02, é superior ao VMP para consumo humano (0,01 mg/L) em 08 das 10 amostras analisadas em fevereiro e novembro; em 09 das 11 amostras analisadas em abril; e em 03 das 6 amostras analisadas em agosto.

Para recreação, o VMP do chumbo é de 0,05 mg/L. Em fevereiro, 05 amostras foram iguais ou superiores a este valor. Em abril e agosto, apenas um PM registrou concentração superior. Os poços de monitoramento que tiveram concentrações superiores aos valores máximos permitidos determinados pela legislação podem ser visualizados no gráfico da Figura 54.

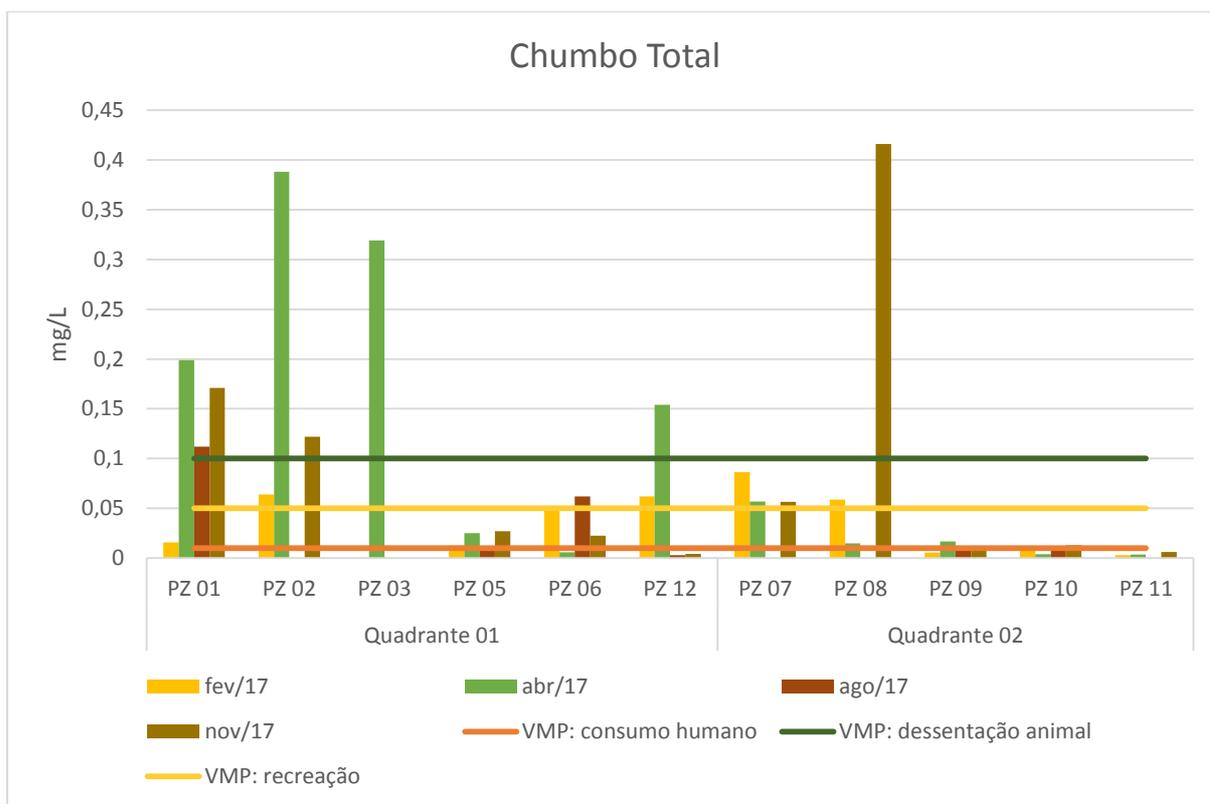


Figura 54. Concentrações de chumbo total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.

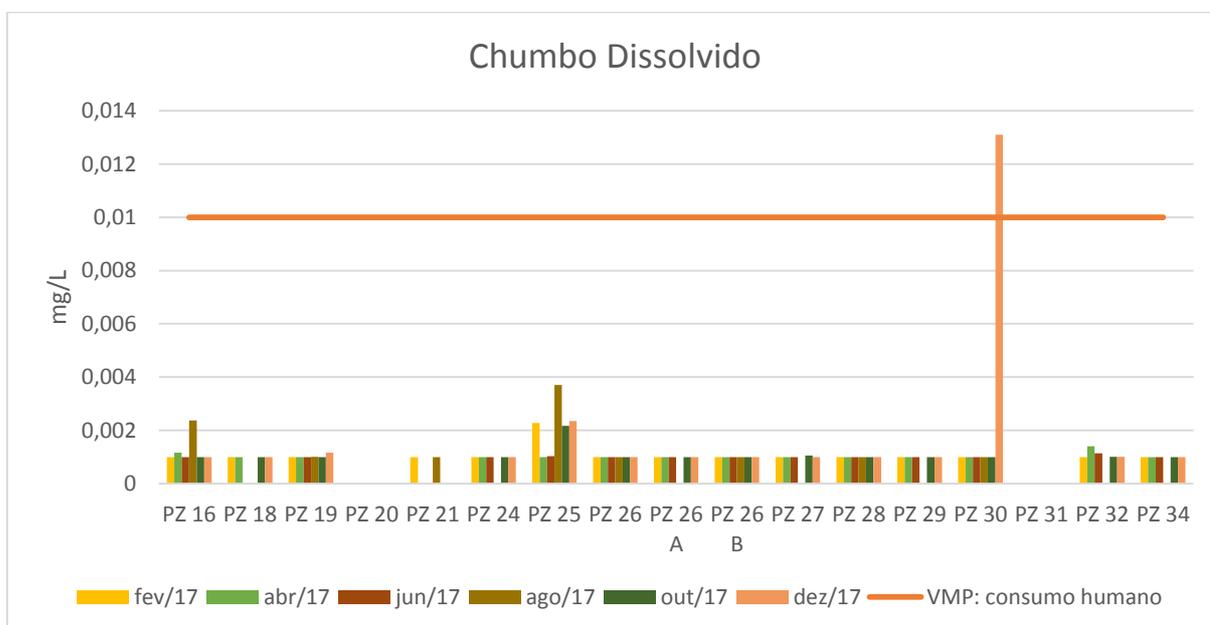


Figura 55. Concentrações de chumbo dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação vigente.

As concentrações de **chromo total** excederam os valores máximos permitidos para consumo humano e recreação (0,05 mg/L) em 07 poços no período de fevereiro,

08 em abril, 02 em agosto, 01 em outubro, 03 em novembro e 03 em dezembro. Ressalta-se que nos meses de fevereiro e abril foram realizadas coletas na maioria dos poços, em relação aos demais meses em que nem todos os poços foram analisados.

Em relação ao VMP para irrigação, de 0,1 mg/L, a concentração de cromo apresentou-se superior a este em 02 amostras em fevereiro, 03 amostras em abril, 01 amostra em junho, 02 amostras em agosto, 01 amostra em outubro, 02 amostras em novembro e 03 amostras em dezembro. Em relação ao VMP para dessedentação animal, somente uma amostra no período de fevereiro apresentou valor superior ao estabelecido pela norma, em 1,0 mg/L. A relação dos poços e meses que apresentaram concentrações superiores está expressa no gráfico da Figura 56.

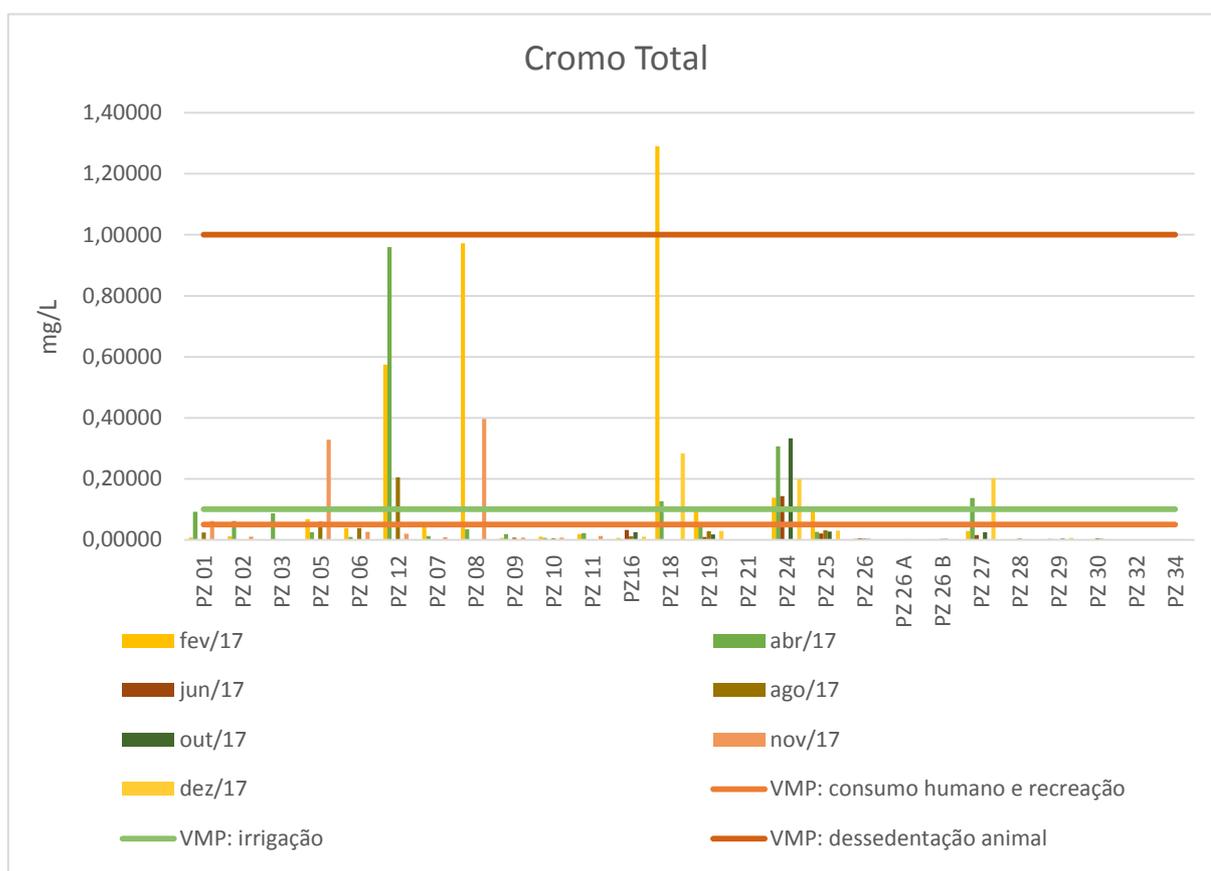


Figura 56. Concentrações de cromo total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação.

O **cromo dissolvido** foi superior aos valores máximos permitidos para consumo humano, recreação e também irrigação no PM 05, apenas, no período de

novembro. A relação das concentrações de cromo dissolvido registradas em cada poço de monitoramento é expressa no gráfico da Figura 57.

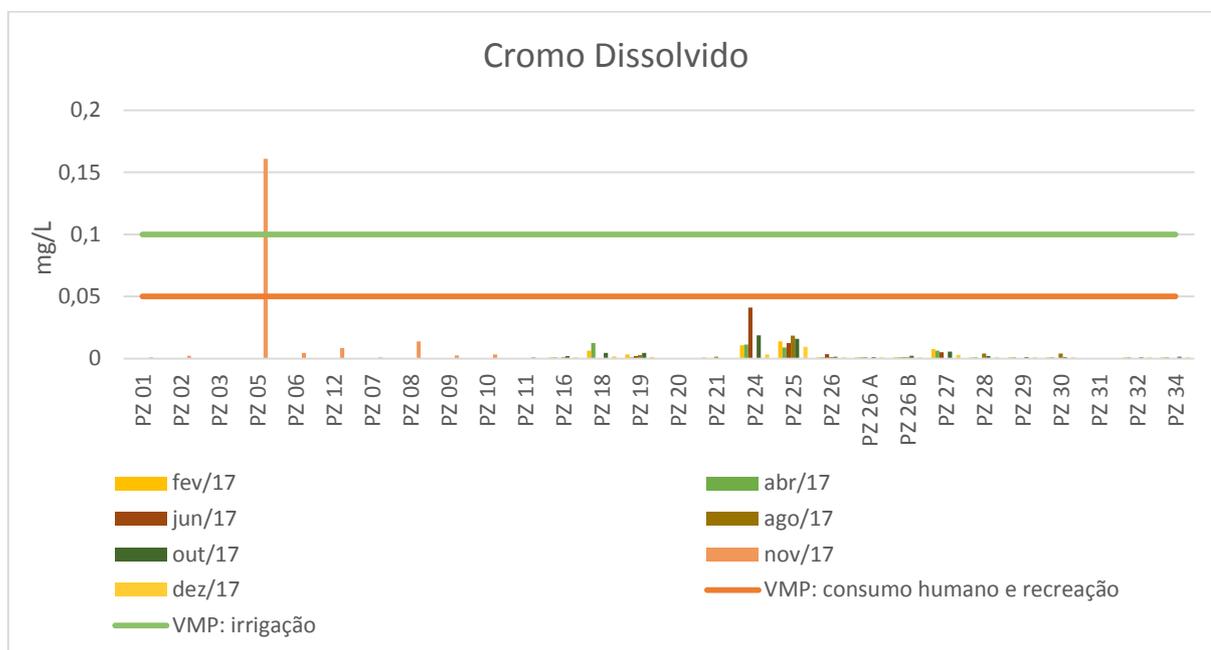


Figura 57. Concentrações de cromo dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação.

As concentrações de **ferro total** ultrapassaram os valores máximos permitidos para consumo humano, recreação e irrigação (determinados em 0,3 mg/L, 0,3 mg/L e 5 mg/L pela legislação) em quase todos os poços de monitoramento, com exceção dos PMs 01 e 09 em fevereiro e dos PM 03 e 06 em abril. As concentrações de ferro total em cada poço são apresentadas no gráfico da Figura 58.

O **ferro dissolvido** foi superior aos valores máximos permitidos para consumo humano e recreação em 07 poços de monitoramento em fevereiro, 07 poços em abril, 04 poços em junho, 01 poço em agosto, 04 em outubro e 07 em dezembro. Em relação ao VMP para irrigação, o PM 24 apresentou concentrações superiores ao longo de três meses de análise, além do PM 25 em abril, PM 18 em abril e dezembro, e o PM 29, em fevereiro. As concentrações de ferro dissolvido em cada poço em relação aos VMPs são indicadas no gráfico da Figura 59.

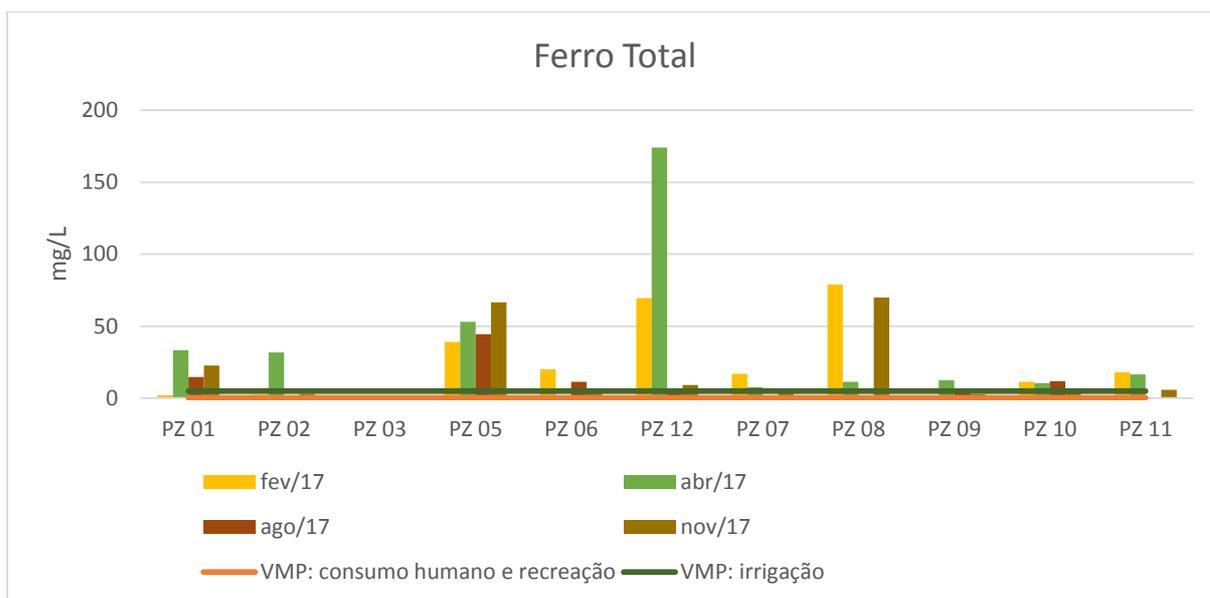


Figura 58. Concentrações de ferro total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos segundo legislação vigente.

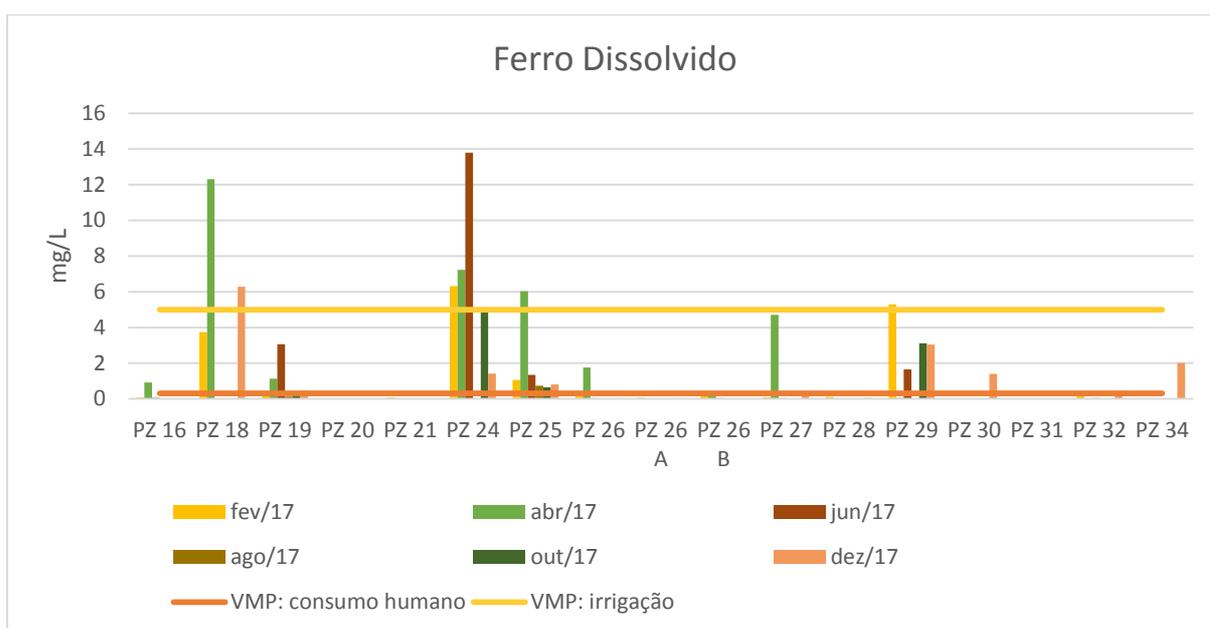


Figura 59. Concentrações de ferro dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação vigente.

Nos PMs 12 e 08, as concentrações de **mercúrio** superaram os valores máximos permitidos para recreação e consumo humano, fixados pela legislação em 0,001 mg/L. A relação destas concentrações com os valores máximos permitidos é indicada no gráfico da Figura 60.

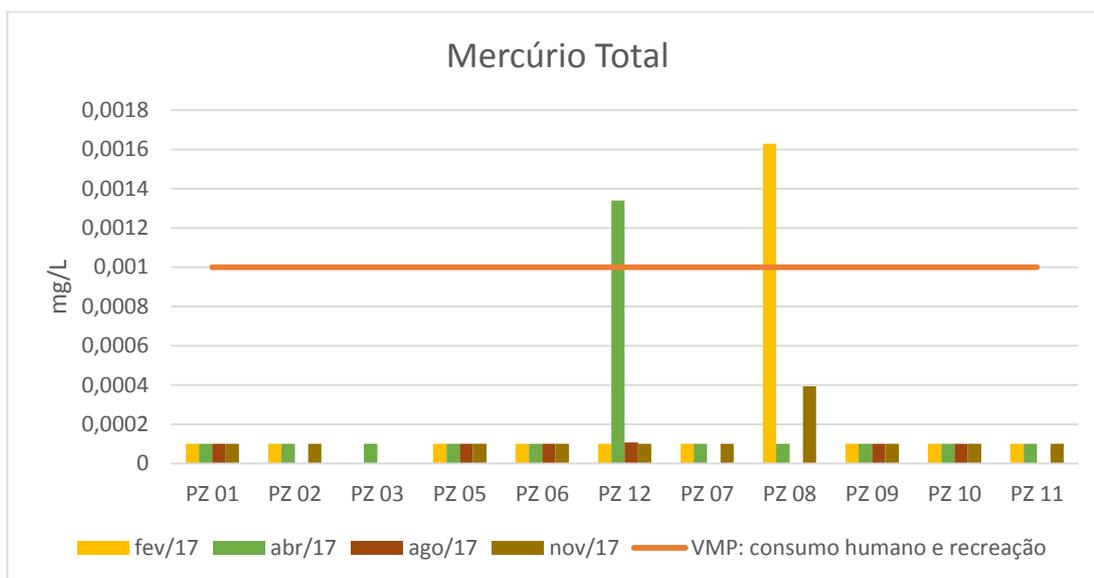


Figura 60. Concentração de mercúrio total, nos quadrantes 01 e 02, em relação aos valores máximos permitidos segundo legislação vigente.

O **sódio total** excedeu o VMP para consumo humano (200 mg/L) nos PMs 08, 09 e 11. O VMP para recreação, estabelecido pela legislação sob um valor de 300 mg/L, foi excedido apenas pelo PM 08, conforme mostra o gráfico da Figura 61.

O **sódio dissolvido** excedeu os valores máximos permitidos para consumo humano e recreação apenas no PM 25, sendo que entre abril e outubro as concentrações foram superiores ao VMP para recreação, e entre abril e novembro foram superiores ao VMP para consumo humano (Figura 62)

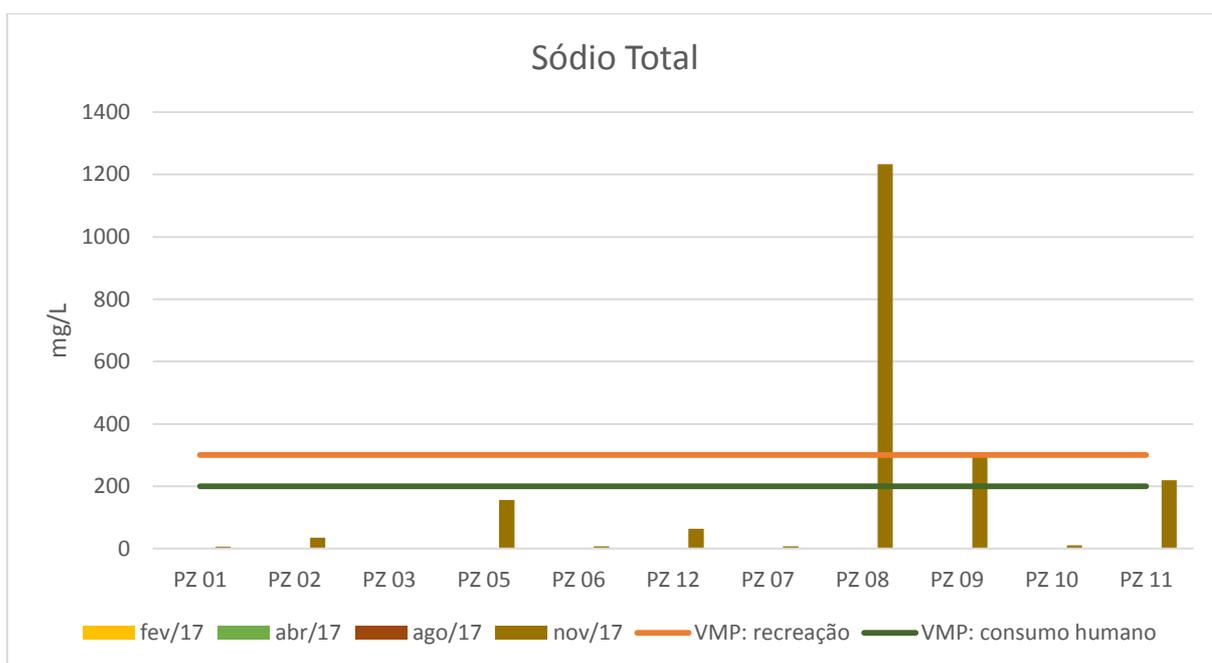


Figura 61. Sódio total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.

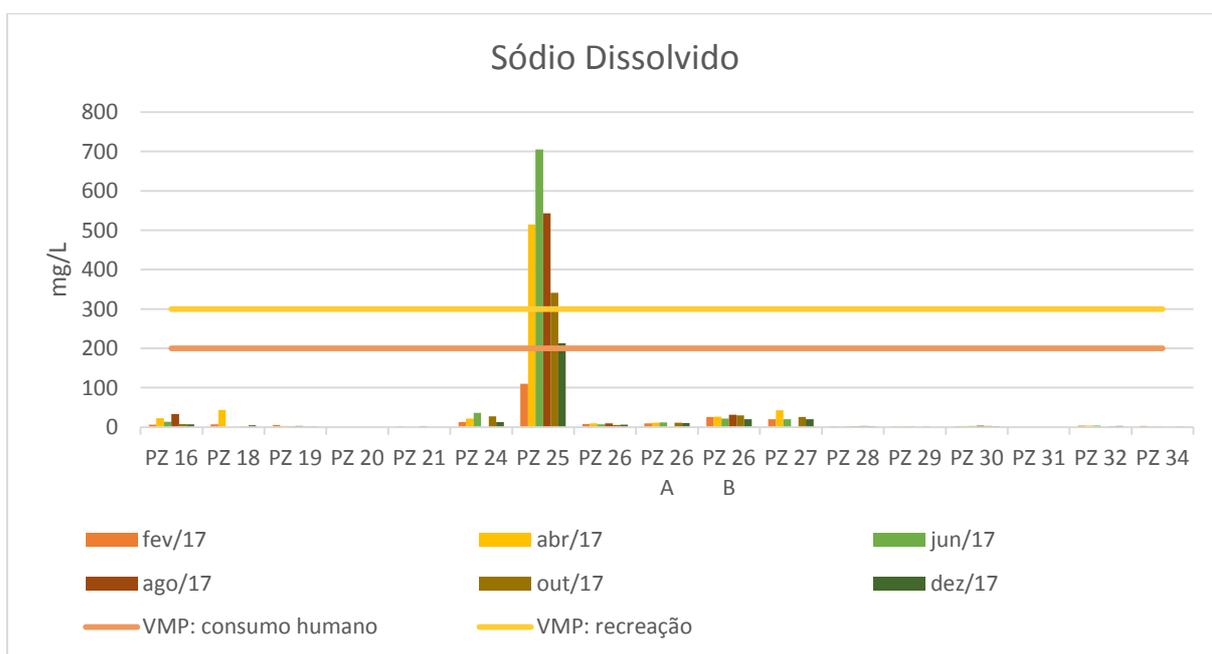


Figura 62. Concentrações de sódio dissolvido nos quadrantes 03, 04 e 05 em relação aos valores máximos permitidos pela legislação.

As concentrações dos elementos: **zinco**, **berílio**, **cádmio**, **cianeto**, **cobalto**, **cobre**, **cromo hexavalente**, **nitrito** e **sulfato** não excedem nenhum dos valores máximos permitidos conforme a legislação.

O **boro total** excede o valor máximo permitido para consumo humano e irrigação (estabelecidos em 0,5 mg/L) no PM 12, em abril, e no PM 02, em abril, sendo que neste ocorre com a mesma concentração do VMP. A relação das concentrações com os valores máximos permitidos segundo a legislação vigente encontra-se no gráfico da Figura 63.

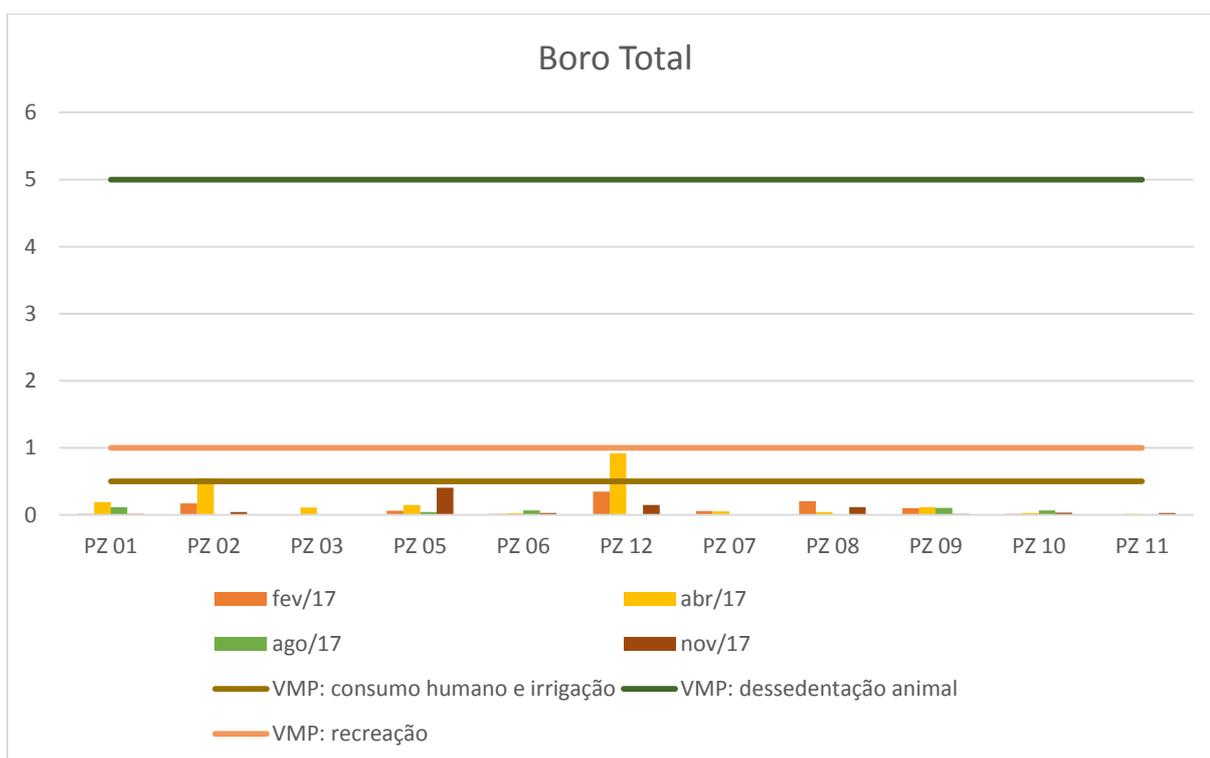


Figura 63 Concentração de boro total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos conforme legislação vigente.

O **antimônio total** apresentou concentrações superiores ao VMP para consumo humano (0,005 mg/L) nos PMs 01, 02, 06 e 07 no período de novembro, e no PM em fevereiro, conforme Figura 64.

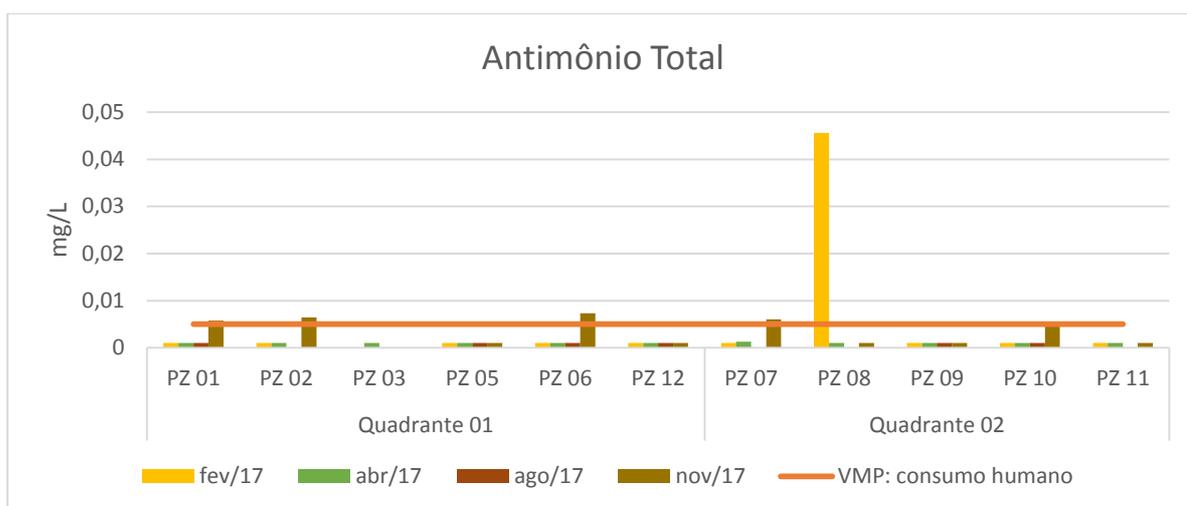


Figura 64. Concentração de antimônio total nos quadrantes 01 e 02 em relação ao valor máximo permitido segundo a legislação vigente.

A legislação define os valores máximos permitidos para o **cloreto** nas águas subterrâneas em valores de 100 mg/L para irrigação, 250 mg/L para consumo humano, 400 mg/L para recreação e um intervalo de 100 mg/L a 700 mg/L para irrigação. Os poços que apresentaram concentrações superiores aos VMPs podem ser identificados no gráfico da Figura 65. Ressalta-se que a maioria dos poços, com exceção dos pertencentes ao quadrante 05, apresentaram valor superior ao VMP mínimo para irrigação e consumo humano. Somente o PM 11, na análise de abril, apresentou valor superior aos 700 mg/L do VMP máximo para irrigação.

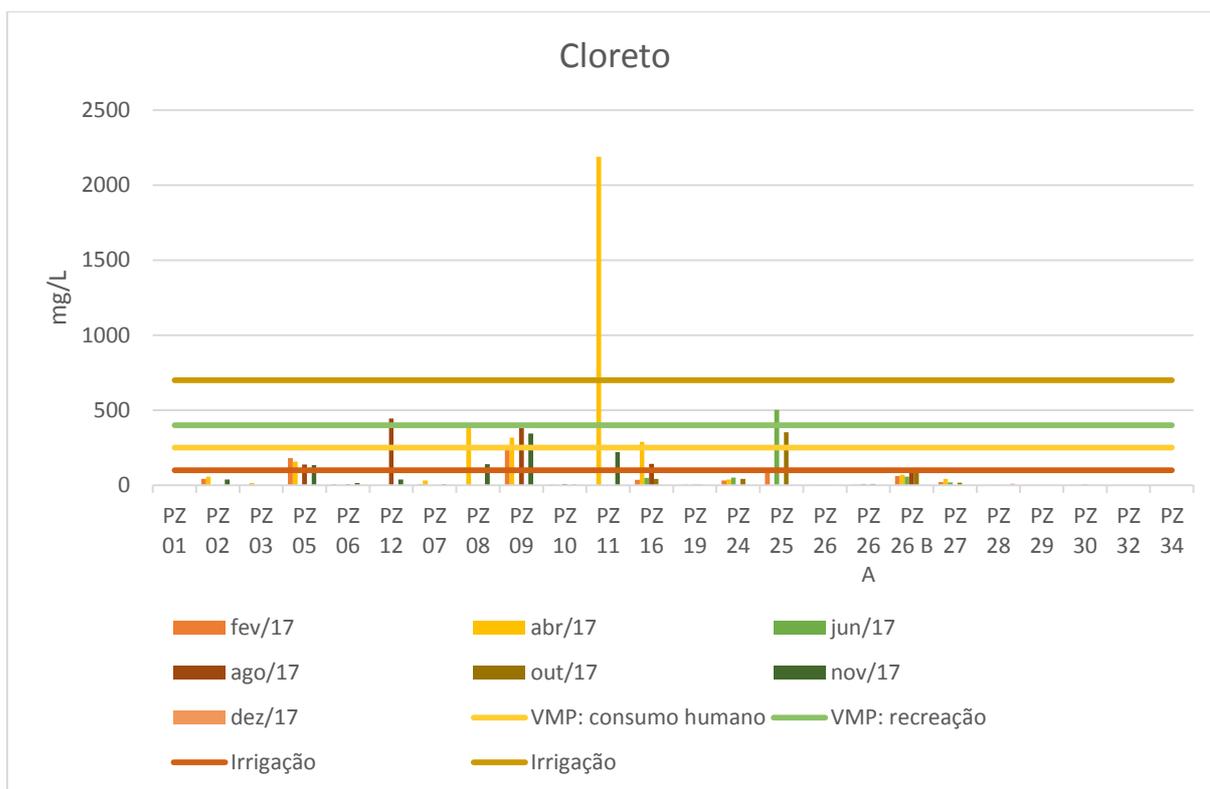


Figura 65. Concentração de cloretos em relação aos valores máximos permitidos pela legislação ambiental vigente.

O **manganês total** apresentou concentrações superiores ao VMP para dessedentação animal (0,05 mg/L) em todos os poços de monitoramento. A única análise que apresentou concentração inferior foi a do mês de fevereiro no PM 01.

Em relação aos VMPs para consumo humano e recreação, estabelecidos em 0,1 mg/L, somente esta mesma análise de fevereiro, no PM 01, apresentou concentração inferior.

Diversos poços também apresentaram concentrações superiores ao VMP para irrigação, estabelecido em 0,2 mg/L, sendo que somente o PM 01, PM 06 e PM 11 apresentaram concentração inferior, e somente em um dos meses de coleta. Na Figura 66 é possível observar a relação das concentrações em cada poço, para cada período de análise em relação aos VMPs.

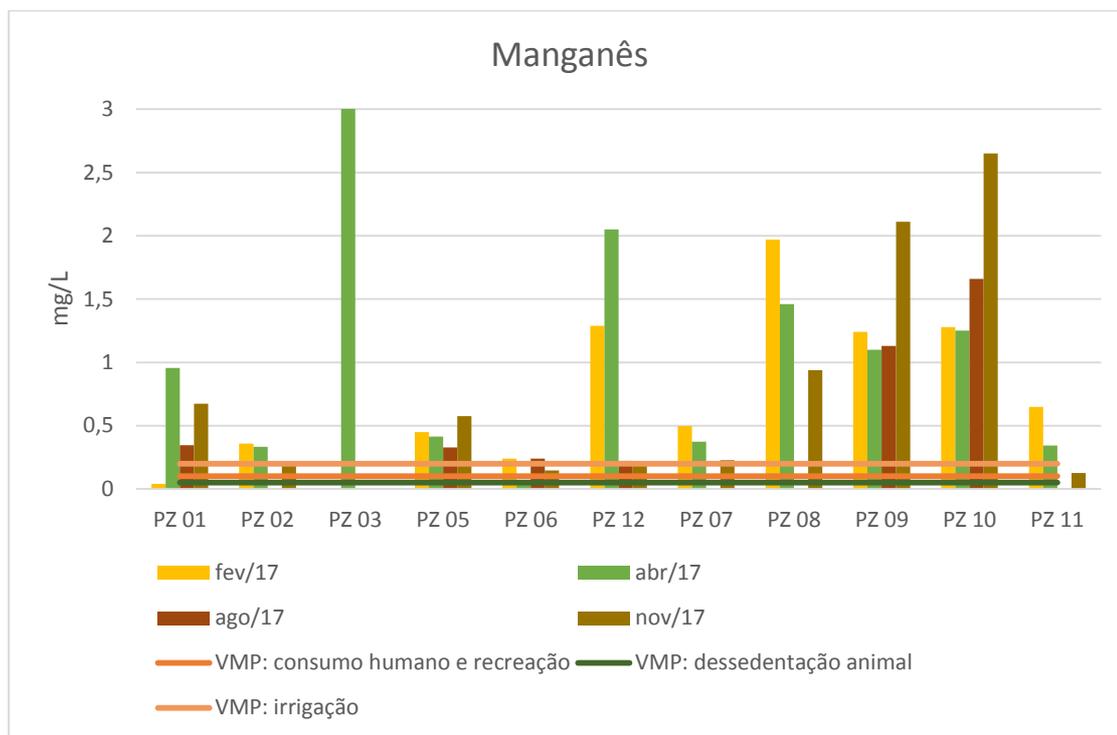


Figura 66. Concentração de manganês total nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos segundo a legislação vigente. Os valores do eixo vertical foram reduzidos a fim de visualizar melhor as linhas de cada valor máximo permitido.

O **nitrito** apresentou concentração superior aos valores máximos permitidos para consumo humano e recreação (10 mg/L) em uma série de poços dos quadrantes 01 e 02, e que podem ser observados no gráfico da Figura 67. Nenhum PM apresentou concentração superior ao VMP para dessedentação animal, estabelecido em 90 mg/L.

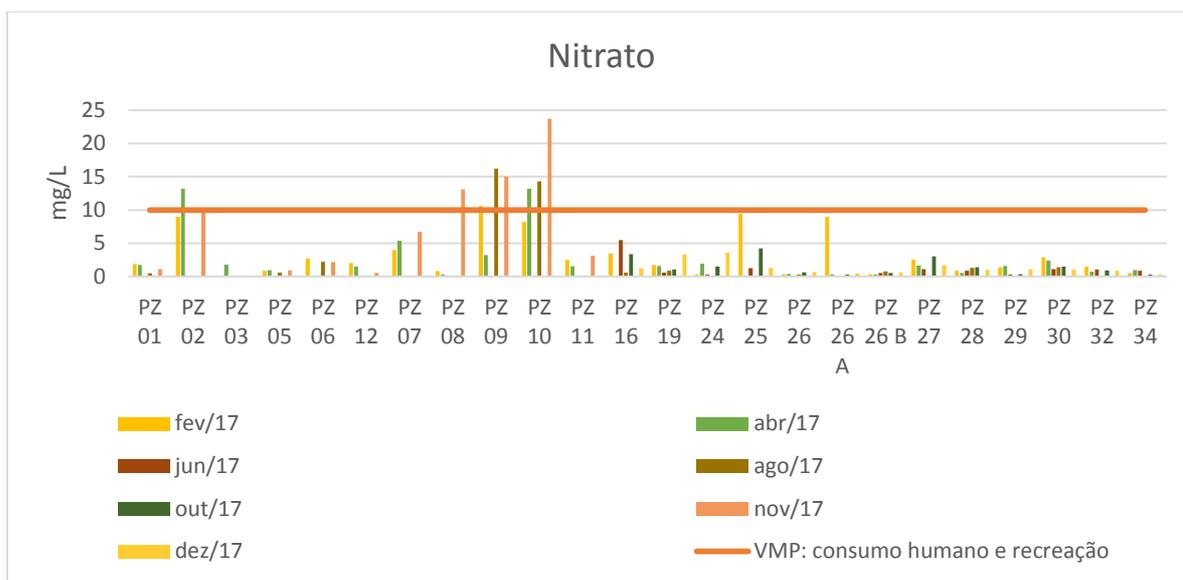


Figura 67. Concentração de nitrato nos poços de monitoramento em relação aos valores máximos permitidos conforme legislação.

O **níquel**, sob a alíquota total, excedeu o valor máximo permitido para consumo humano (0,02 mg/L) nos PMs 01, 03, 12 e 08. O PM 08, ainda, registrou em abril, uma concentração superior aos valores máximos permitidos para recreação (0,1 mg/L) e irrigação (0,2 mg/L). A relação das concentrações em cada poço e em cada mês de análise com os VMPs é apresentada no gráfico da Figura 68.

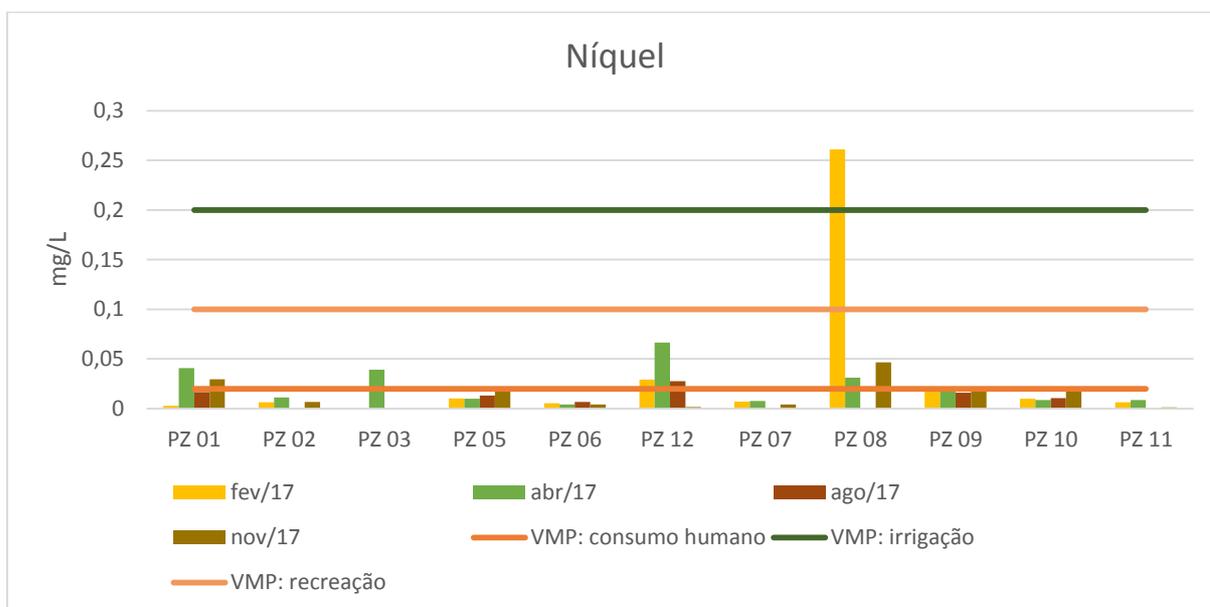


Figura 68. Concentração de níquel nos quadrantes 01 e 02 em relação aos valores máximos permitidos estabelecidos pela legislação.

A análise dos **sólidos totais dissolvidos** foi realizada para todos os poços de monitoramento do empreendimento, contemplando os cinco quadrantes. O valor

máximo permitido pela legislação para os sólidos totais dissolvidos é de 1000 mg/L para o consumo humano. Analisando o gráfico da Figura 69, observa-se que esta concentração é excedida em diversos poços de monitoramento, de diversos quadrantes do empreendimento, com exceção do quadrante 05, onde não há operação do aterro.

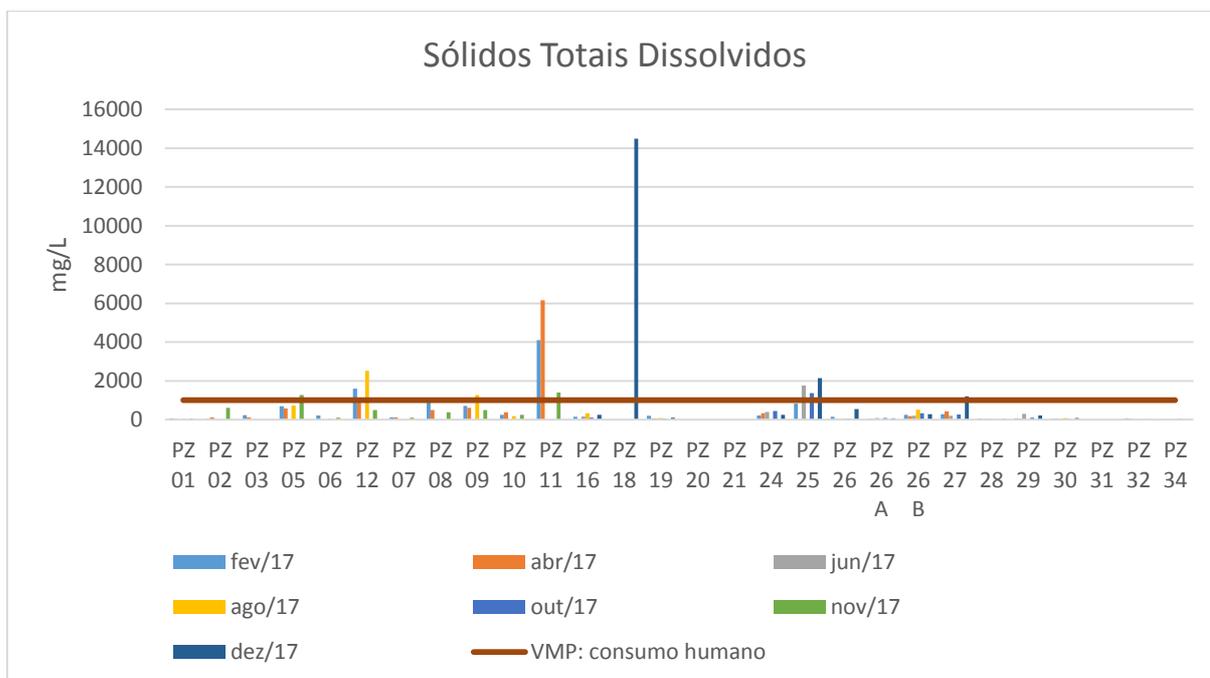


Figura 69. Concentrações de sólidos totais dissolvidos em relação ao valor máximo permitido estabelecido pela legislação.

O quadro a seguir mostra os parâmetros que apresentaram pelo menos uma coleta com concentrações superiores a algum VMP proposto pela resolução nº 396 do CONAMA (2008), ou seja, apresentam alguma restrição de uso de acordo com a legislação vigente. Os parâmetros são diferenciados pela alíquota total e dissolvida, sendo que as colunas destacadas indicam que o parâmetro apresentou restrição de uso sob aquela alíquota, enquanto os campos em branco indicam que não houve restrição de uso. Os campos marcados com o sinal “-“, indicam que não houve análise sob a alíquota correspondente.

Quadro 3. Parâmetros das águas subterrâneas que apresentaram alguma restrição de uso durante o períodos de análise, conforme os VMPs do CONAMA. Os campos destacados em vermelho são os que apresentaram restrição de uso.

Parâmetros das águas subterrâneas com restrição de uso		
Parâmetro	Total	Diss.
Alumínio		
Arsênio		
Bário		
Chumbo		
Cromo		
Ferro		
Mercúrio		
Sódio		
Boro		-
Antimônio		-
Cloreto		-
Manganês		-
Nitrato		-
Níquel		-

7.6 VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS

Os resultados obtidos para a vulnerabilidade dos aquíferos da área de estudo foram obtidos com o processamento dos dados necessários de cada método no software ArcGIS, com a confecção de mapas de cada parâmetro, e sua posterior combinação para a geração do mapa final.

A seguir, o resultado obtido para cada método será individualizado, com uma posterior comparação entre os resultados.

7.6.1 Método GOD

Conforme já mencionado no item 6 - METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO, o método GOD utiliza três parâmetros para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas.

O primeiro parâmetro, “G”, trata do grau de confinamento das águas subterrâneas. Este parâmetro pode variar de um peso mínimo de 0,2 quando ocorre um fluxo jorrante ascendente, até o peso máximo de 1, quando o aquífero não é confinado (FOSTER & HIRATA, 2002). Considerando que está sendo analisado o aquífero freático da área, este parâmetro obteve o peso máximo de 1 ponto, para toda a extensão da área de estudo.

Na Figura 70 é apresentado o mapa resultante do parâmetro “G” para a área, de forma que não apresenta o mesmo peso para o parâmetro em toda sua extensão.

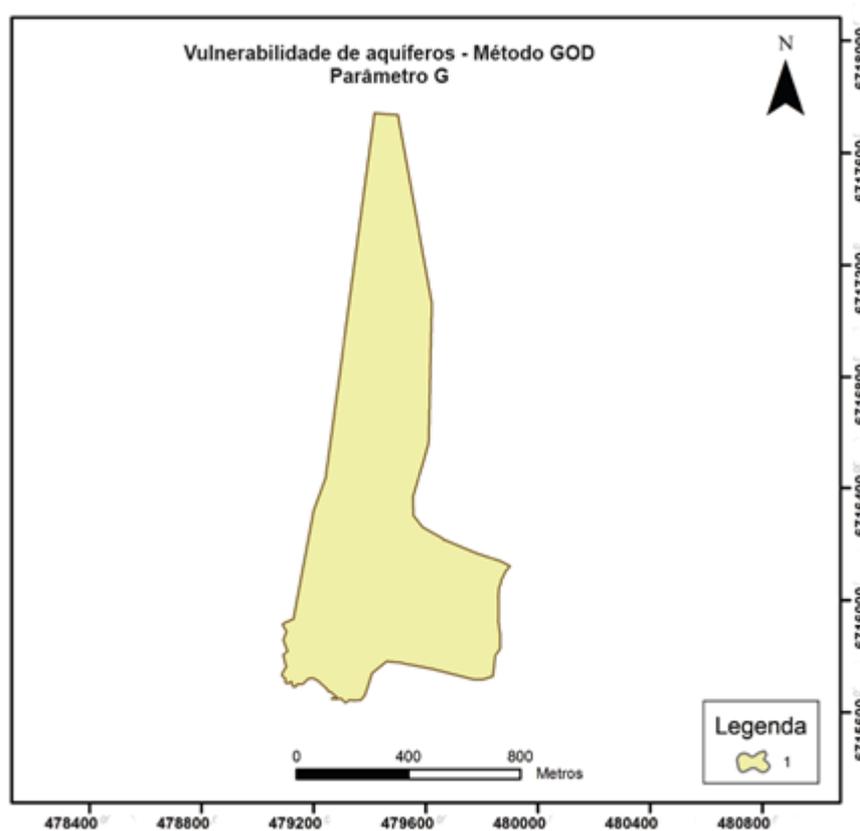


Figura 70. Mapa do parâmetro “G” da área de estudo. O mapa apresenta a mesma cor e o mesmo peso do parâmetro em toda sua extensão, pois o aquífero analisado é o freático em toda a área de estudo, portanto, não confinado.

O segundo parâmetro “O” trata basicamente da litologia ou material que ocorre no substrato. Conforme citado no item 4, o contexto geológico local é representado pelas formações sedimentares da Bacia do Paraná e por Sedimentos Cenozoicos.

Na área, a Bacia do Paraná, representada pela Formação Sanga do Cabral apresenta ocorrência de siltitos laminados e de arenitos finos a médios com boa porosidade, que por vezes encontra-se obstruída (7.1.2 - **Análise Petrográfica**). Dessa forma, atribuiu-se um peso de 0,6 para a área onde ocorrem os siltitos e de 0,7

para o arenito. O siltito ocorre ao longo da área atual de operação, enquanto os arenitos ocorrem ao longo da área de ampliação, ainda em licenciamento ambiental.

Os sedimentos cenozoicos, por sua vez, receberam um peso um pouco superior, de 0,75, em relação aos arenitos da Fm. Sanga do Cabral, por se tratarem de sedimentos inconsolidados e possuírem menor contribuição de finos, tornando-se assim, mais porosos e permeáveis.

A Figura 71 apresenta o mapa resultante da classificação destes pesos para cada formação.

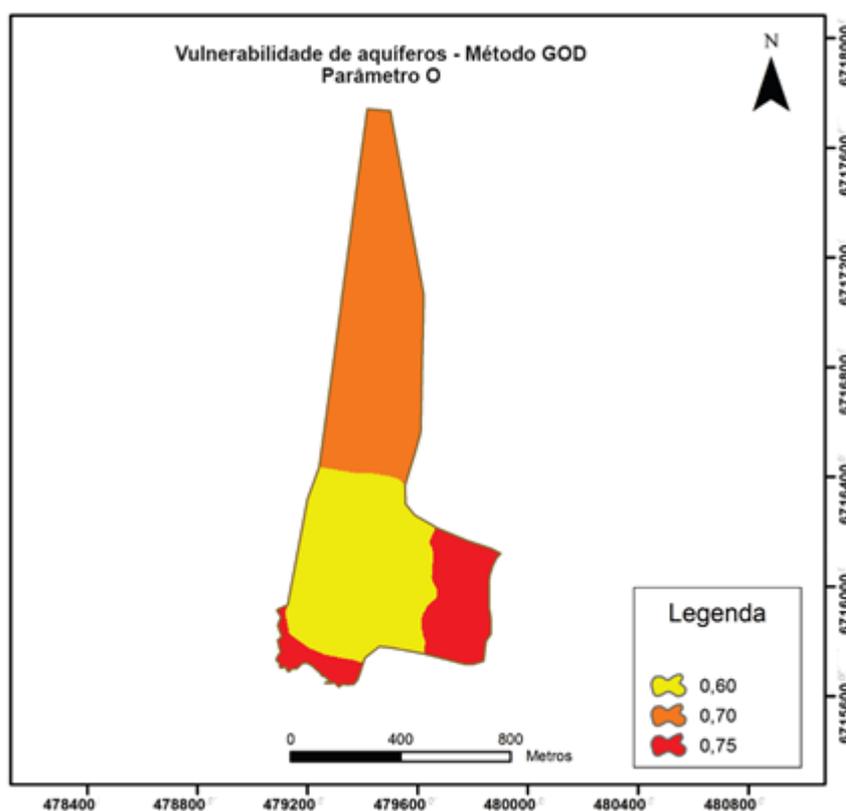


Figura 71. Mapa resultante da classificação dos valores para o parâmetro “O”. A região amarela é representada pelos siltitos da Formação Sanga do Cabral, e a laranja, pelos arenitos. A área em vermelho, que recebeu o maior peso para o parâmetro, compreende os Sedimentos Cenozoicos.

O último parâmetro deste método, “D”, compreende a profundidade do nível d’água na área de estudo. Para este parâmetro, utilizou-se as medidas mais recentes do nível d’água realizadas nos poços de monitoramento, consultadas no acervo da Geoprospec.

Tabela 30. Poços de monitoramento e seus respectivos níveis estáticos da área do empreendimento.

PM	N.E. (m)	PM	N.E. (m)
PM 1	0,93	PM 20	1,852
PM 2	5,61	PM 21	3,53
PM 3	1,5	PM 22	1,374
PM 4	3,1	PM 23	1,154
PM 5	4	PM 24	0,4
PM 6	5,46	PM 25	0,7
PM 7	0,74	PM 26	2,21
PM 8	1,73	PM 26B	5,05
PM 9	1,93	PM 27	2,48
PM 10	1,07	PM 28	1,39
PM 11	1,16	PM 29	1,29
PM 12	4,27	PM 30	0,86
PM 14	1,68	PM 31	1,8
PM 16	1,75	PM 32	1,93
PM 17	1,742	PM 33	1,88
PM 18	2,06	PM 34	0,97
PM 19	1,32		

Os níveis estáticos foram interpolados através do método *IDW – Inverse distance weighted*, do módulo das ferramentas de análise espacial do software ArcMap. A potência utilizada foi 2.

As classes resultantes obtiveram pesos inferiores a 0,9 quando a profundidade do nível estático foi superior a 5 metros. Valores superiores a 0,9 foram aplicados para as profundidades inferiores a 5 metros, de forma que as maiores pontuações foram atribuídas para profundidades muito próximas ao nível do solo.

A Figura 72 representa o mapa do parâmetro “D” resultante da interpolação dos níveis estáticos medidos nos poços de monitoramento. Os pesos atribuídos ao parâmetro variaram de 0,85 a 0,95.

Os níveis estáticos mais profundos estão na região correspondente aos siltitos da Formação Sanga do Cabral, que apresenta menor permeabilidade em relação aos arenitos da mesma Formação e aos Sedimentos Cenozoicos, que são mais permeáveis e apresentaram níveis mais rasos.

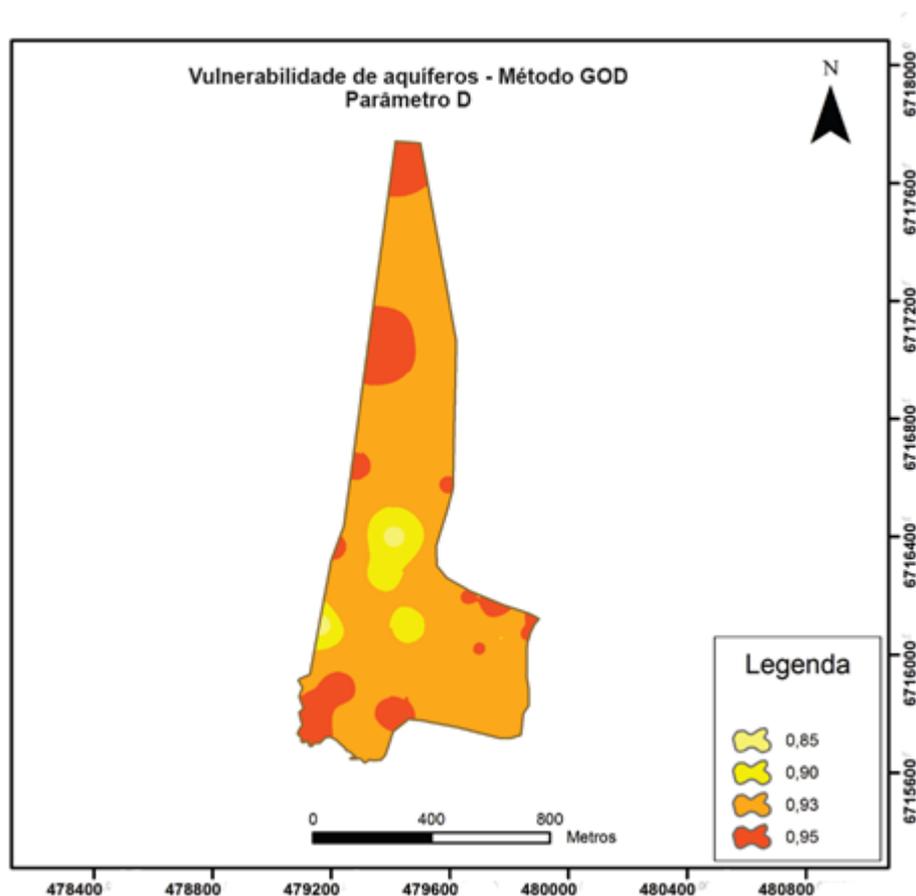


Figura 72. Mapa do parâmetro “D”, resultante da interpolação dos níveis estáticos. É possível observar que os menores pesos, correspondentes aos níveis estáticos mais profundos correspondem ao contexto geológico dos siltitos da Formação Sanga do Cabral, de menor permeabilidade.

O processamento final dos mapas consistiu na utilização da ferramenta álgebra de mapas do ArcMap, a fim de multiplicar os mapas dos parâmetros “G”, “O” e “D” apresentados, obtendo assim, um mapa produto final.

O mapa final do método GOD é apresentado na Figura 73. A partir dos valores obtidos com a multiplicação dos três mapas, obteve-se uma vulnerabilidade variando de alta a extrema.

Os menores valores, de 0,5 a 0,6 coincidem com os siltitos da Formação Sanga do Cabral. Já os valores entre 0,6 e 0,7 foram registrados nas Formações Sanga do Cabral – arenito e nos Sedimentos Cenozicos. Valores de vulnerabilidade extrema, acima de 0,7 foram registrados em ocorrências localizadas no contexto dos Sedimentos Cenozoicos, apenas.

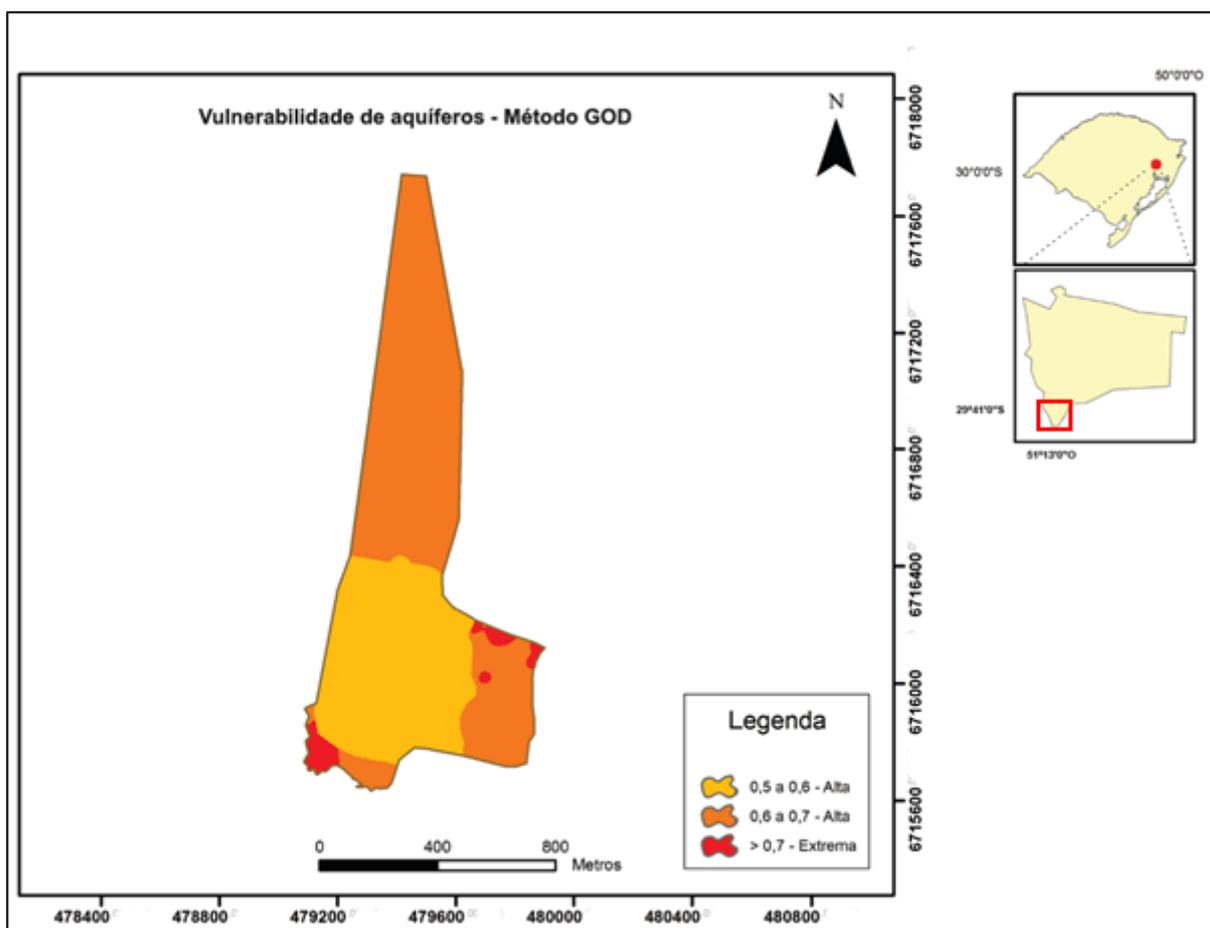


Figura 73. Vulnerabilidade do aquífero freático na área pelo método GOD, variando de alta a extrema.

7.6.2 Método DRASTIC

O método DRASTIC avalia a vulnerabilidade de águas subterrâneas levando sete parâmetros em consideração, sendo que cada um apresenta um peso relativo diferente, e a escala de critérios variando de 1 a 10.

A seguir, será apresentado o mapa de cada um dos sete parâmetros, e por fim, a configuração final, resultante da combinação destes.

O parâmetro “D”, da mesma forma que na metodologia GOD, representa o nível estático da água subterrânea medido nos poços de monitoramento do local. Desta forma, os valores utilizados e o método de interpolação (IDW) mantiveram-se os mesmos em relação ao método anterior. Para a metodologia DRASTIC, este parâmetro possui um peso de valor 5.

Entretanto, como se tratam de propostas diferentes, a escala dos critérios é diferente, e assim, os valores classificados variaram de pesos 7 a 10.

O peso 7, onde a ocorrência da água subterrânea é mais profunda, envolve essencialmente os siltitos da Formação Sanga do Cabral. Os valores 9 e 10 ocorrem essencialmente nos arenitos desta mesma Formação e nos Sedimentos Cenozoicos, conforme Figura 74.

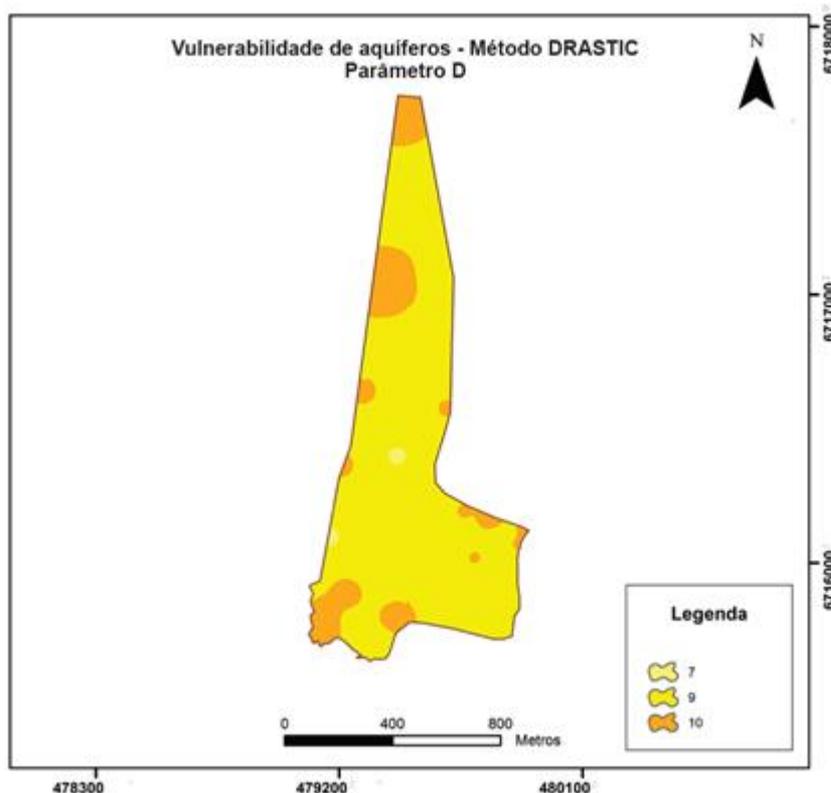


Figura 74. Parâmetro “D” da metodologia DRASTIC, que avalia a profundidade do nível estático na área de estudo.

O parâmetro “R”, que considera a recarga ao aquífero em questão, possui um peso de 4 pontos. Para a definição deste parâmetro utilizou-se dados pluviométricos para aplicação do método do balanço hídrico.

Foram utilizados dados pluviométricos e temperaturas médias mensais de 27 anos, entre os anos de 1990 e 2017, obtidos do banco de dados do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, estação Porto Alegre, código 83967, conforme explicado no item 6 - METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO.

A partir dos dados pluviométricos, calculou-se a média de precipitação mensal, de janeiro a dezembro, a fim de obter a precipitação total.

O mesmo foi realizado para os valores de temperatura. O valor resultante foi aplicado à equação de Thornthwaite (1948), que utiliza as temperaturas médias mensais para obter a evapotranspiração da área.

Os gráficos das figuras abaixo representam os valores de precipitação total (PPT) média processados a partir dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia, além dos valores de evapotranspiração (EVT) obtidos a partir da aplicação da equação de Thornthwaite. Os valores médios calculados a partir do processamento dos dados de temperatura e precipitação constam ao final deste projeto, como anexo V. Os valores dos coeficientes “I”, “a” e seu processamento para o cálculo da evapotranspiração, também constam nos anexos ao final do projeto (anexo VI).

O deflúvio foi estimado de acordo com o coeficiente de deflúvio da tabela proposta por ASCE (1992), adotando-se assim, um valor de de 0,25 para o siltito, 0,20 para o arenito e 0,15 para os sedimentos cenozoicos, em função de seus teores de argila e declividade do terreno, que afetam sua permeabilidade.

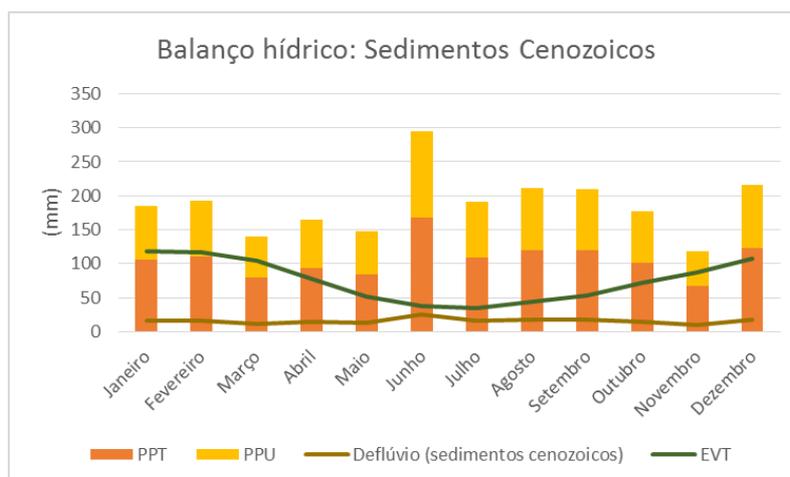


Figura 75. Dados de precipitação total e útil, deflúvio e evapotranspiração obtidos para a realização do balanço hídrico da unidade Sedimentos Cenozoicos.

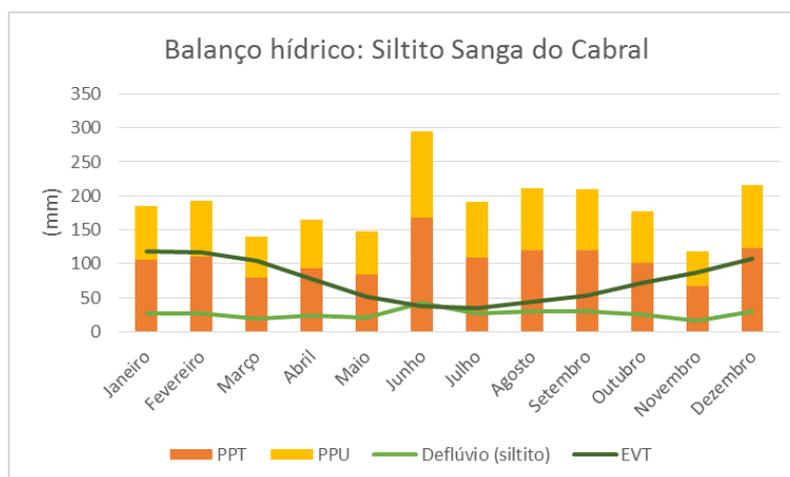


Figura 76. Dados de precipitação total e útil, deflúvio e evapotranspiração obtidos para a realização do balanço hídrico do siltito – Formação Sanga do Cabral.

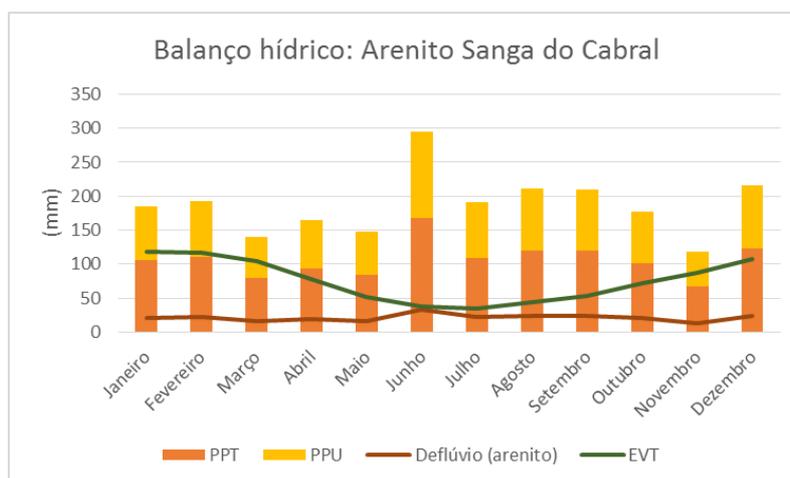


Figura 77. Dados de precipitação total e útil, deflúvio e evapotranspiração obtidos para a realização do balanço hídrico do arenito – Formação Sanga do Cabral.

Realizando a diferença entre a precipitação útil e a evapotranspiração é possível identificar os meses onde há déficit hídrico e também aqueles em que há água disponível para recarga. As tabelas usadas para confecção dos gráficos acima, que compreendem o balanço hídrico, constam ao final do projeto em anexo (anexo VII).

O período que não ocorre déficit é essencialmente de maio a novembro, permitindo a recarga das águas subterrâneas. O gráfico da Figura 78 apresenta os valores mensais disponíveis para recarga para cada uma das unidades geológicas. A soma obtida representa um total de 233 mm/ano de recarga para o siltito da Formação Sanga do Cabral e de 269mm/ano para o arenito. Para os Sedimentos Cenozoicos, o valor foi de 305mm/ano.

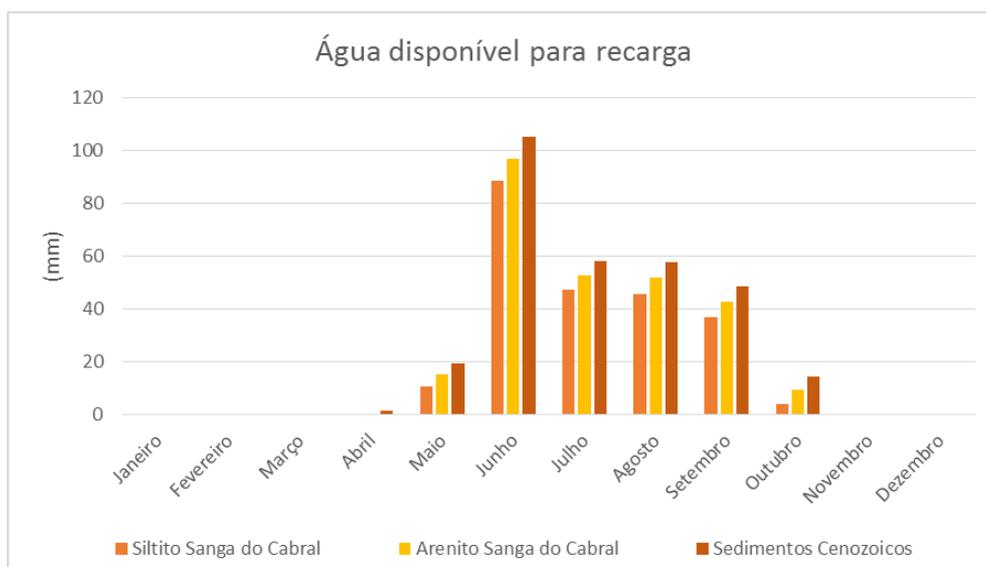


Figura 78. Recarga das águas subterrâneas para cada unidade geológica.

Enquadrando os valores totais na escala proposta por Aller *et al.* (1987) o siltito recebe um valor de 8 pontos, e as demais unidades de 9 pontos.

O mapa confeccionado para este parâmetro é apresentado na Figura 79.

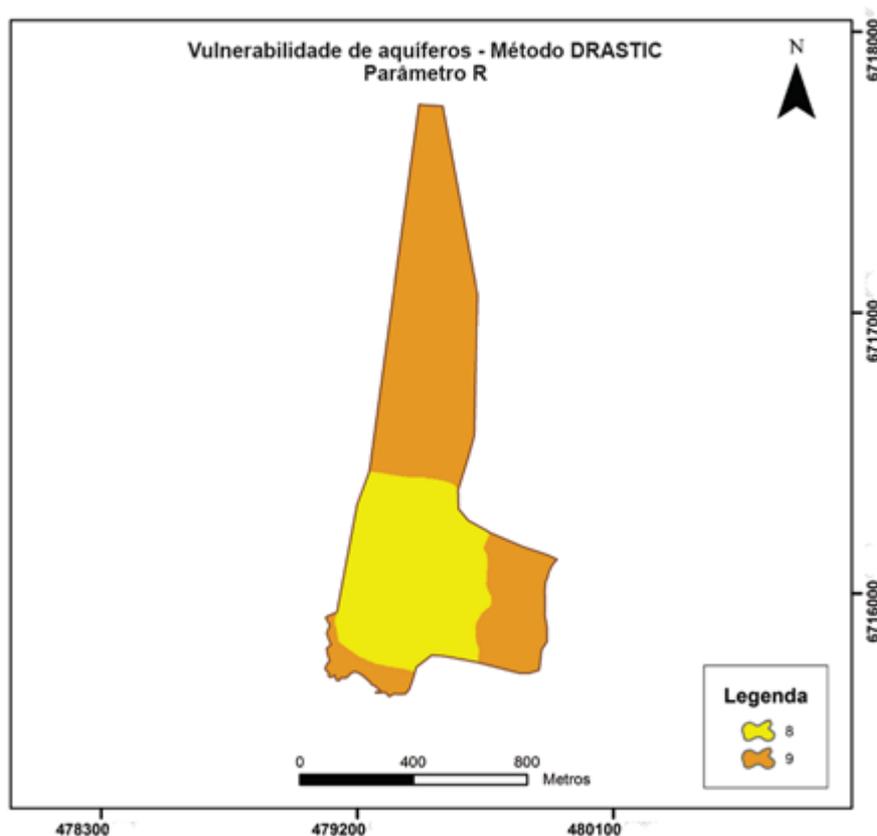


Figura 79. Parâmetro "R", de forma que a recarga ao aquífero é menor para o siltito da Formação Sanga do Cabral e maior para o restante, recebendo pesos 8 e 9, respectivamente.

O terceiro parâmetro, “A”, considera a litologia do aquífero, recebendo um peso de 3 pontos. Dessa forma, atribuiu-se um peso de 5 pontos para o siltito e 6 para o arenito, pertencentes à Formação Sanga do Cabral. Para o sedimento inconsolidado da unidade Sedimentos Cenozoicos atribuiu-se um valor de 7 pontos, conforme Figura 80.

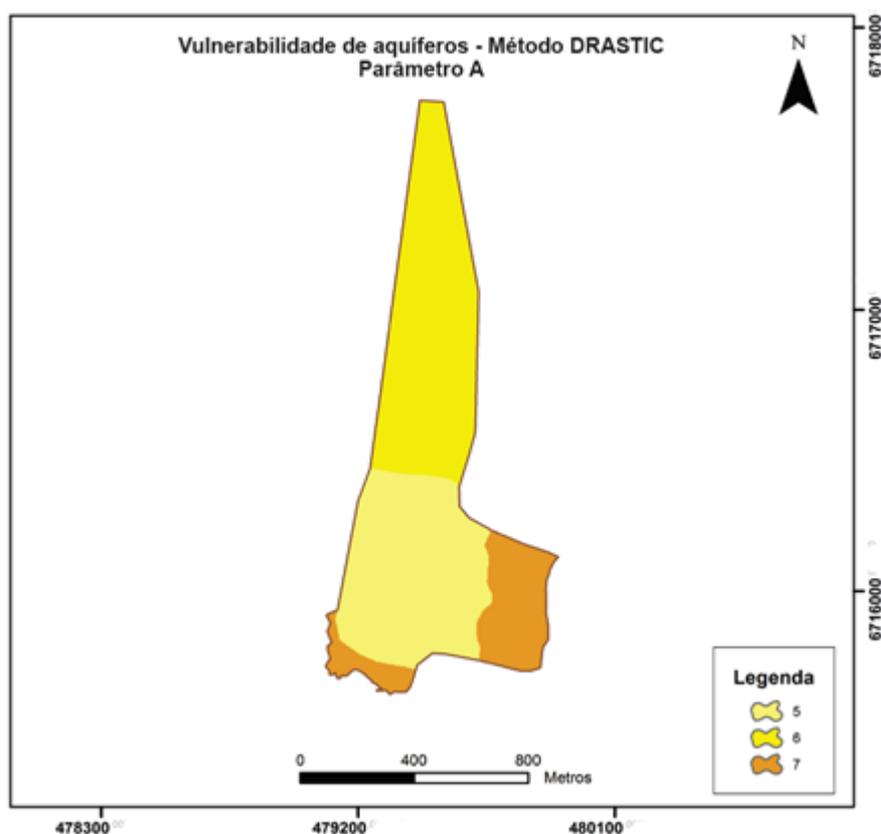


Figura 80. Pesos atribuídos ao parâmetro “A”, que considera a litologia/material do aquífero estudado. O menor valor foi atribuído ao siltito da Formação Sanga do Cabral e o maior, aos Sedimentos Cenozoicos.

O parâmetro “S” considera o tipo de solo do aquífero, e possui peso de 2 pontos. Dessa forma, considerando as análises granulométricas e mineralógicas realizadas, além de dados secundários como perfis de poços de monitoramento, boletins de sondagem, entre outros, atribuiu-se um peso menor ao solo que ocorre na unidade do siltito (Formação Sanga do Cabral), por apresentar maiores teores de argila em relação ao arenito desta Formação e aos Sedimentos Cenozoicos. Os pesos e o mapa gerado a partir da classificação destes valores é apresentado na Figura 81.

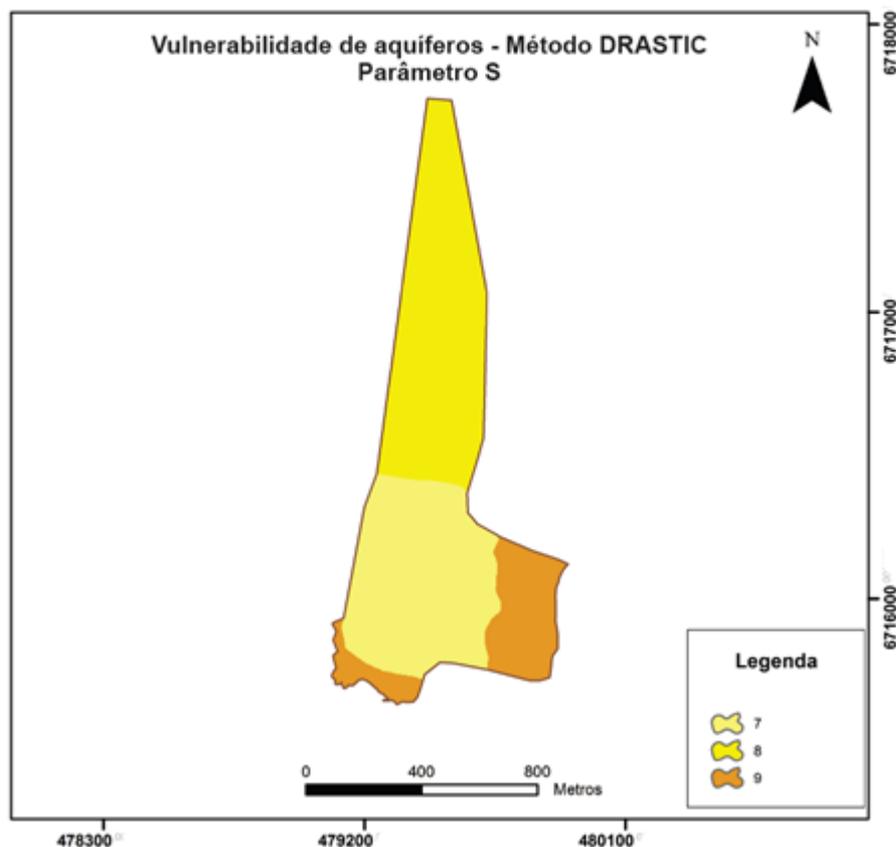


Figura 81. Mapa do parâmetro S, que considera os solos da área de estudo. Para o siltito da Formação Sanga do Cabral atribuiu-se um valor de 7 pontos, e para o arenito, de 8. Para os Sedimentos Cenozoicos, o valor foi o mais alto, de 9 pontos.

A topografia do local também é analisada pela metodologia DRASTIC, correspondendo ao parâmetro “T”. Com base nas declividades do terreno da área, os valores foram divididos em 5 classes, com pesos de 1 a 10, de forma que os menores valores correspondem às áreas mais íngremes, e valores muito altos, às áreas mais planas, mais susceptíveis à contaminação. O mapa para este parâmetro consta na Figura 82.

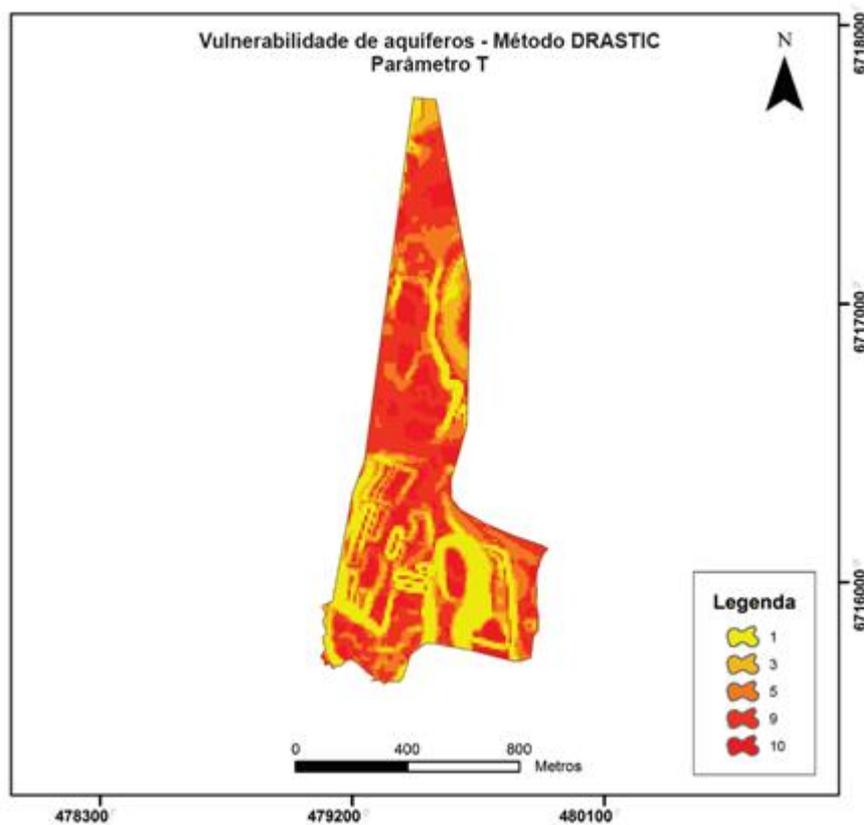


Figura 82. Parâmetro “T” do método DRASTIC, considerando 5 classes de declividade onde valores extremos representam áreas mais planas, com maior vulnerabilidade à contaminação.

O parâmetro “I” tem um peso de 5 pontos e representa o material da zona vadosa da área estudada. Como o material da área é composto essencialmente por areia e com contribuições variadas de argila, atribuiu-se um valor menor para as áreas que apresentam maior quantidade de silte e argila, neste caso, correspondente à área da unidade em que ocorre o siltito da Formação Sanga do Cabral, recebendo 6 pontos. Na área onde ocorre o arenito desta Formação, também há uma contribuição de argila, aplicando-se um peso de 7 pontos.

A unidade em que ocorrem os Sedimentos Cenozoicos, por apresentar uma grande contribuição arenosa em sua zona vadosa, conforme análises granulométricas, receberam o maior peso, de 8 pontos. O mapa da Figura 83 apresenta as divisões e os pesos atribuídos para este parâmetro.

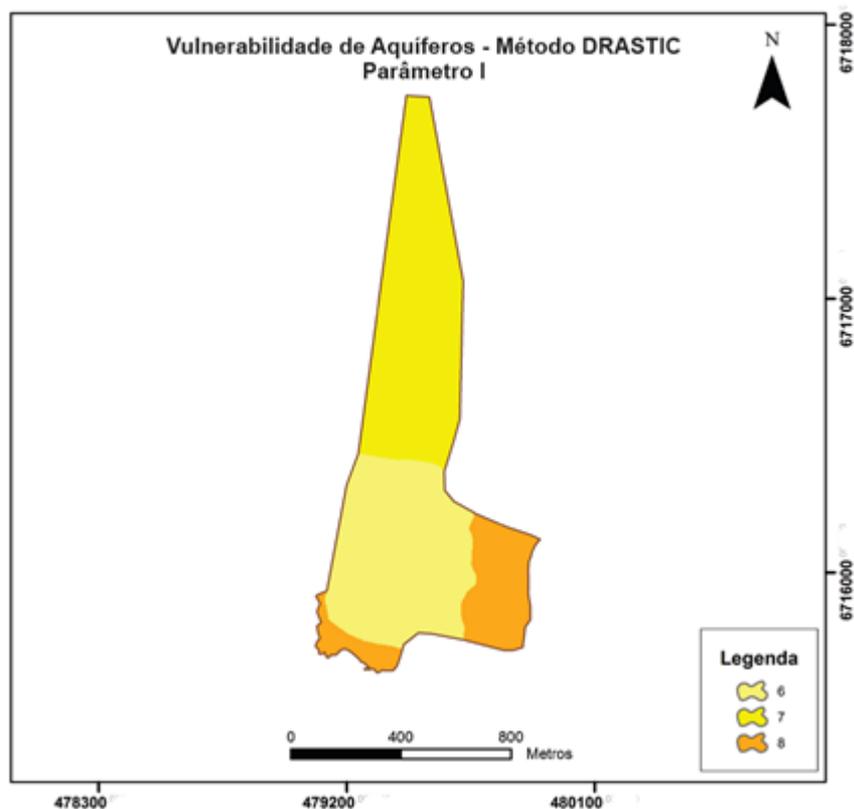


Figura 83. Mapa do parâmetro “I”, representando o peso dos materiais que ocorrem na zona vadosa da área de estudo.

Por fim, o último parâmetro (C), com peso 3 de relevância para a álgebra dos mapas considera a condutividade hidráulica do aquífero.

Os valores para este parâmetro foram obtidos através dos resultados de *slug test* realizados em 12 dos poços de monitoramento da área de estudo pela empresa Geoprospec, conforme apresentados no gráfico da Figura 84. Os valores foram obtidos pela aplicação do método de Hvorslev (1951).

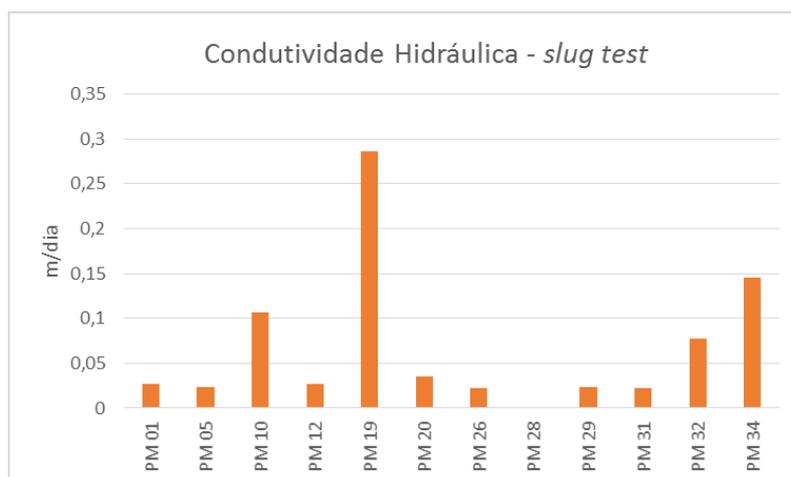


Figura 84. Valores de condutividade hidráulica em m/dia obtidos através de slug test para os poços de monitoramento. Fonte: Geoprospec (2012).

Entretanto, ao reclassificar os valores para atribuir o peso dos critérios conforme metodologia proposta por Aller *et al.* (1987), toda a área recebeu peso de valor 1, para condutividades que variam de 0 a 4,1 m/dia (Figura 85).

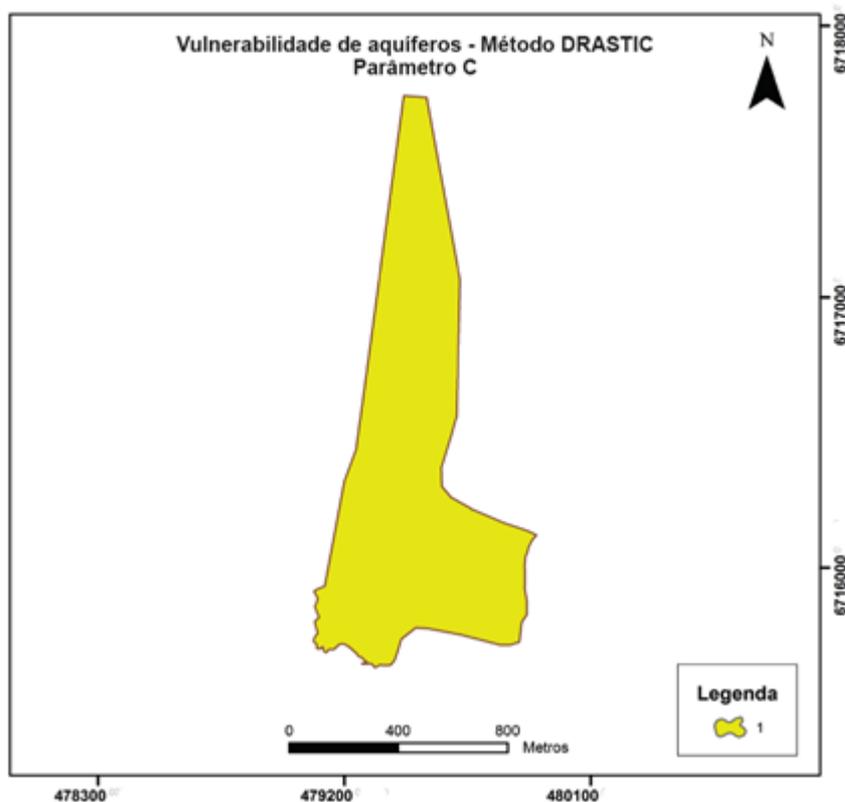


Figura 85. Mapa do parâmetro "C" representando os valores de condutividade hidráulica da área de estudo, que receberam peso mínimo.

Cada um dos sete mapas apresentado acima foi combinado pela ferramenta “álgebra de mapas” do ArcMap, multiplicada pelo seu peso. Portanto, a “fórmula” aplicada neste módulo foi a seguinte:

$$\text{DRASTIC} = (\text{Parâmetro D} * 5) + (\text{Parâmetro R} * 4) + (\text{Parâmetro A} * 3) + (\text{Parâmetro S} * 2) + (\text{Parâmetro T} * 1) + (\text{Parâmetro I} * 5) + (\text{Parâmetro C} * 3)$$

O produto obtido a partir desta combinação foi um mapa final de vulnerabilidade de aquífero, onde os valores variaram em classes consideradas moderadas a alta, conforme Figura 86.

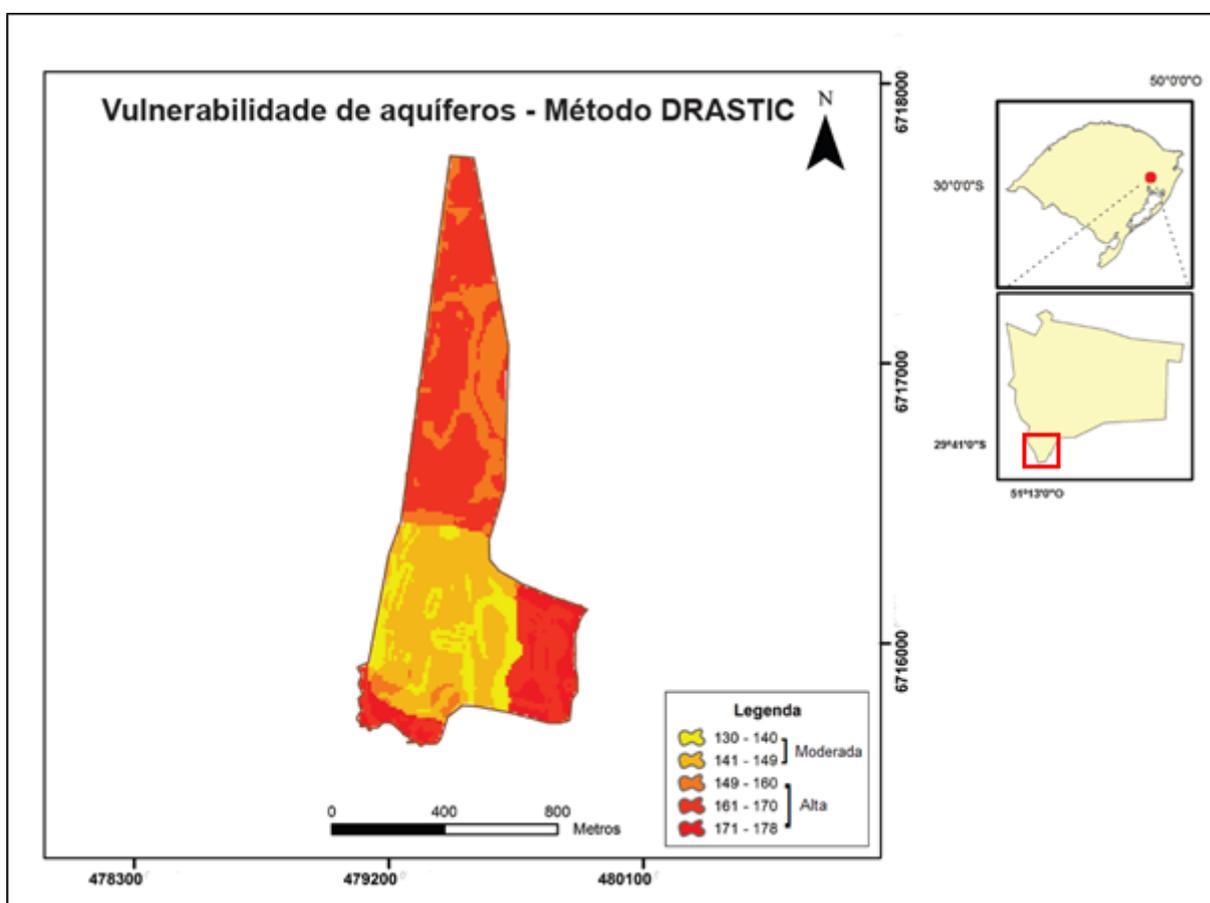


Figura 86. Mapa final de vulnerabilidade do aquífero local, produto da combinação dos sete parâmetros do método DRASTIC. O resultado indica que a área apresenta vulnerabilidade moderada a alta.

7.6.3 Análise Comparativa: GOD e DRASTIC

Os dois métodos para análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas compreendem métodos clássicos empregados para este fim. O DRASTIC pode apresentar algumas limitações no aspecto da dificuldade de se obter tantos parâmetros, mas acaba fornecendo uma análise mais detalhada. O GOD já é mais facilmente empregado, visto que utiliza somente três parâmetros que são de mais fácil aquisição.

Abaixo, a Figura 87 exhibe novamente os resultados dos mapas gerados pelos dois métodos para fins de comparação.

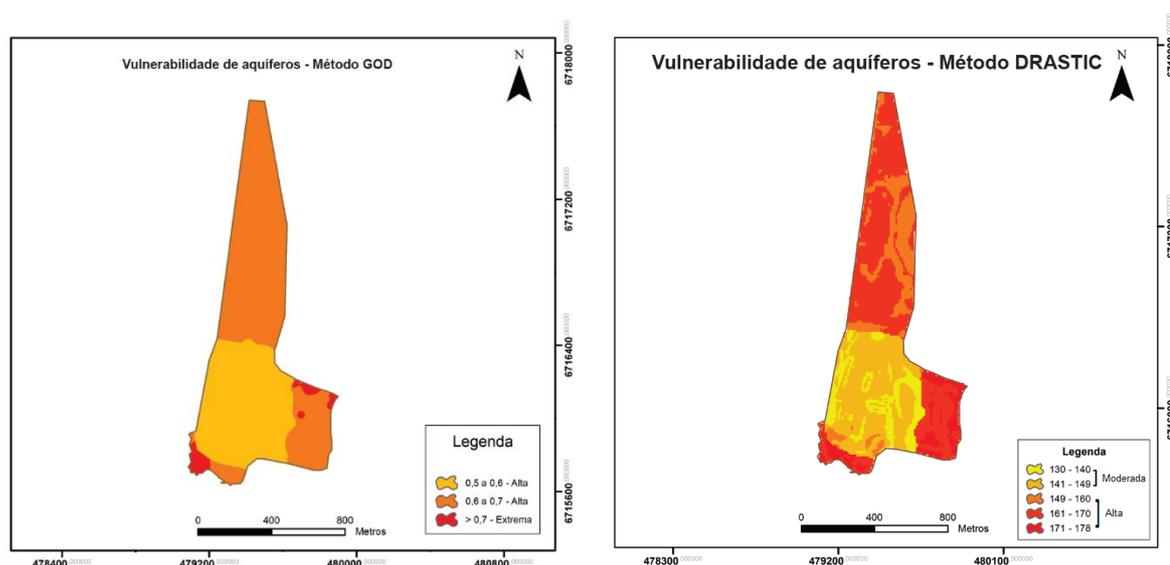


Figura 87. Comparativo do resultado obtido pelos métodos GOD e DRASTIC.

A principal diferença na aplicação entre os dois métodos é que, de acordo com o método GOD, a área varia de vulnerabilidades altas a extrema, enquanto os valores obtidos pelo DRASTIC indicam escalas moderadas a altas.

Essa diferença ocorre principalmente pelo fato do DRASTIC utilizar um número maior de parâmetros, e que possuem pesos diferentes.

Os dois mapas apontam uma semelhança no que diz respeito aos limites das unidades geológicas da área. As divisões ficam muito claras em ambos os resultados, e isso acontece principalmente por que muitos parâmetros analisados estão interligados com a geologia, como por exemplo, o tipo de solo, o material da zona vadosa, áreas de recarga, entre outros. Dessa forma, os mapas gerados para estes parâmetros têm seus limites coincidentes com os limites das unidades geológicas.

Uma diferença considerável também ocorre pela aplicação do parâmetro “T”, ou seja, a topografia do local. É possível perceber variações internas no mapa final do DRASTIC que refletem as condições de declividade no local, podendo acentuar ou então reduzir a vulnerabilidade em certos pontos.

A metodologia DRASTIC apontou bons resultados, mais detalhados que o GOD, principalmente pela área ser mais restrita permitindo assim a aquisição de todos os dados em escala de detalhe. Quando se trabalha com áreas maiores, como por exemplo municípios e bacias, a aquisição e o processamento de um grande volume de dados é dificultada, e então, o método GOD pode ser uma alternativa mais viável.

8 CONCLUSÕES

O levantamento de dados secundários, coleta de dados de campo na área de estudo e sua posterior interpretação em laboratório indicou três unidades geológicas ocorrentes na área de estudo. Análises granulométricas, mineralógicas e petrográficas auxiliaram na confecção de mapas de vulnerabilidade das águas subterrâneas do aquífero freático local e também na interpretação da contaminação dos solos e águas subterrâneas.

A vulnerabilidade do aquífero foi identificada como alta a extrema através da aplicação da metodologia GOD, e média a alta com a utilização do DRASTIC. A metodologia DRASTIC considera uma série de parâmetros a mais na análise da área, fornecendo um maior detalhe para a técnica, portanto, foi considerado como o método mais adequado para esta área.

O chorume registra uma série de potenciais contaminantes que foram detectados nas análises químicas do solo e água subterrânea, e que em diversos casos, representaram fontes de contaminação.

A contaminação no solo foi registrada para os parâmetros arsênio, bário, chumbo, cianeto, cloreto, cobre, cromo, nitrogênio amoniacal e zinco. Alguns destes parâmetros apresentaram um aumento significativo no mês de outubro, quando foi detectada a contaminação, e podem ser explicados pelo aumento no regime de chuvas, que ficou acima da média em diversos meses do ano, principalmente em outubro, que foi o mês mais chuvoso do ano e também o mês da análise dos solos com maior concentração. As chuvas e seu escoamento superficial podem estar trazendo contaminantes ao percolar em células e lagoas de tratamentos de resíduos próximas, ou então da estação de tratamento de efluentes do local, trazendo consigo estes contaminantes e aumentando suas concentrações

O principal mecanismo de transporte de contaminantes se dá pelo fluxo superficial, pois a contaminação do solo ocorre na zona subsaturada do aquífero. Entretanto, considerando o aquífero freático local e suas baixas cotas do nível estático, também se observou contaminação das águas subterrâneas, pelos parâmetros bário, cromo, ferro, mercúrio, sódio, cloreto e nitrato.

A avaliação ambiental da área conforme as resoluções vigentes do CONAMA indicam que não há restrição de uso para os solos da área. Já para as águas subterrâneas, principalmente os parâmetros sob a alíquota total, mostram uma série de restrições de uso. Os parâmetros que apresentaram restrições de uso para as alíquotas total e dissolvida são: alumínio, bário, chumbo, cromo, ferro e sódio. Os parâmetros arsênio, mercúrio, boro, antimônio, cloreto, manganês, nitrato e níquel possuem restrição de uso para a alíquota total (com exceção do arsênio e mercúrio, esta foi a única alíquota analisada). As águas subterrâneas do empreendimento, portanto, estão impróprias para uma série de usos, sendo que alguns dos parâmetros que apresentaram restrições de uso não se associam com a contaminação na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração**. Rio de Janeiro. 2002.
- ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- ABNT. **NBR 15495-2: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados Parte 1: Projeto e construção**. Rio de Janeiro. 2007.
- AESRD. **Nitrate in groundwater**. Alberta Environmental and Sustainable Resource Development. [S.l.]. 2011.
- ALLER, L. et al. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. United States Environmental Protection Agency. [S.l.], p. 29. 1987.
- ASCE. **Design and construction of Urban Stormwater Management Systems**. [S.l.]: American Society of Civil Engineers, 1992.
- AUGUSTIN JR, P. V. **Avaliação ambiental e caracterização geoquímica de contaminantes em solo e água subterrânea na área do aterro de resíduos industriais da UTRESA na região do Vale dos Sinos, em Estância Velha, RS**. Porto Alegre. 2011.
- AUGUSTIN JR, P. V.; VIERO, A. P. Environmental impact and geochemical behavior of soil contaminants from an industrial waste landfill in Southern Brazil. **Environmental Earth Sciences** v. 67, n. 5, p. 1521-1530, 2012.
- BIONDI, C. M.; DO NASCIMENTO, C. W. A.; NETA, A. B. F. Teores naturais de bário em solos de referência do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, Outubro 2011.
- CARRÉ, M. C.; VULLIERMET, A.; VULLIERMET, B. Environmet and tannery, Lyon, France, 1994.
- CEQ. **Contamination of Groundwater by Toxic Organic Chemicals**. [S.l.]: [s.n.], 1981.
- CONAMA. **Resolução 396 de 07 de abril de 2008**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. [S.l.]. 2008.
- CONAMA. **Resolução 420 de 28 de dezembro de 2009**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. [S.l.]. 2009.
- CONAMA. **Resolução 460 de 30 de dezembro de 2013**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. [S.l.]. 2013.

DEJWAKH, N. **Sources of nitrate in groundwater below a major agricultural area: the high plains in mid-west United States.** [S.l.]: [s.n.], 2006.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise do Solo.** Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, v. 2, 1997. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvho tqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf>.

FEPAM. **Relatório sobre a Geração de Resíduos Sólidos Industriais no Estado do Rio Grande do Sul.** Fundação Estadual de Proteção Ambiental. Porto Alegre. 2003.

FEPAM. **Portaria FEPAM nº 85/2014.** Porto Alegre. 2014.

FEPAM; ENGEBIO. **Plano de Resíduos Sólidos do Rio Grande do Sul.** Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.

FETTER, C. W. **Applied Hidrogeology.** 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall: [s.n.], 2001.

FOSTER, S. S. D. et al. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies.** [S.l.], p. 101. 2002.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.** Lima: [s.n.], 1988.

GOPROSPEC. **EIA - Estudo de Impacto Ambiental: ampliação da central de resíduos sólidos industriais classes I e II da UTRESA, Estância Velha/RS.** Porto Alegre. 2012.

GOPROSPEC. **Relatório Anual: resultados das análises efetuadas nas águas subterrâneas.** [S.l.]. 2017.

GOPROSPEC. **Plano de Monitoramento do Solo.** Porto Alegre. 2018.

GONÇALVES, C.; HAFNER, J. O setor calçadista no Rio Grande do Sul: uma análise da sua evolução recente, Quarto encontro de economia gaúcha, 2008.

GUIGUER, N.; KOHNKE, M. W. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos.** XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. [S.l.]: [s.n.]. 2012.

GUSWA, J. H. et al. **Groundwater contaminantion and emergency response guide.** New Jersey: Noyes Publications, 1984.

HINRICHS, R. Difração de Raios X com incidência rasante (GIXRD). In: HINRICHS, R. **Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: [s.n.], 2014. p. 204.

HVORSLEV, M. J. Time lag and soil permeability in groundwater observations, p. 1-50, 1951.

KRIEGER, E. I. F. **Avaliação da contaminação das águas subterrâneas a área de influência da usina de tratamento de resíduos S/A - UTRESA, em Estância Velha (RS).** [S.l.]. 2000.

MCMAHON, P. B.; BOHLKE, J. K. Regional Patterns in the Isotopic Composition of Natural and Anthropogenic Nitrate in Groundwater, High Plains, U.S.A. **Environmental Science and Technology**, v. 40, p. 2965-2970, 2006.

MORAES, B. S. **Caracterização físico-química dos percolados gerados na disposição de serragens de couros “wet-blue” e aparas de couros acabados e semi-acabados em células de aterros sanitários.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1999.

MUELLER, D. K.; HELSEL, D. R. Nutrients in the nation's water-Too much of a good thing? **Geological Survey Circular**, 2002.

MURCK, B. W.; SKINNER, B. J.; PORTER, S. C. **Environmental geology.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996.

OLIVEIRA, M. T. G. D.; ROLIM, S. B. A.; MENEGUZZI, A. **Compartimentação Ambiental por Sensoriamento Remoto e Geoquímica, de Áreas Contaminadas do Vale do Rio dos Sinos, RS, Brasil.** XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis: [s.n.]. 2007.

ROCCA, A. C. C. et al. **Resíduos sólidos industriais.** [S.l.]: [s.n.], 1993.

ROISENBERG, C. et al. Caracterização geoquímica e gênese dos principais íons das águas subterrâneas de Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Recursos hídricos**, v. 8, p. 137-147, 2003.

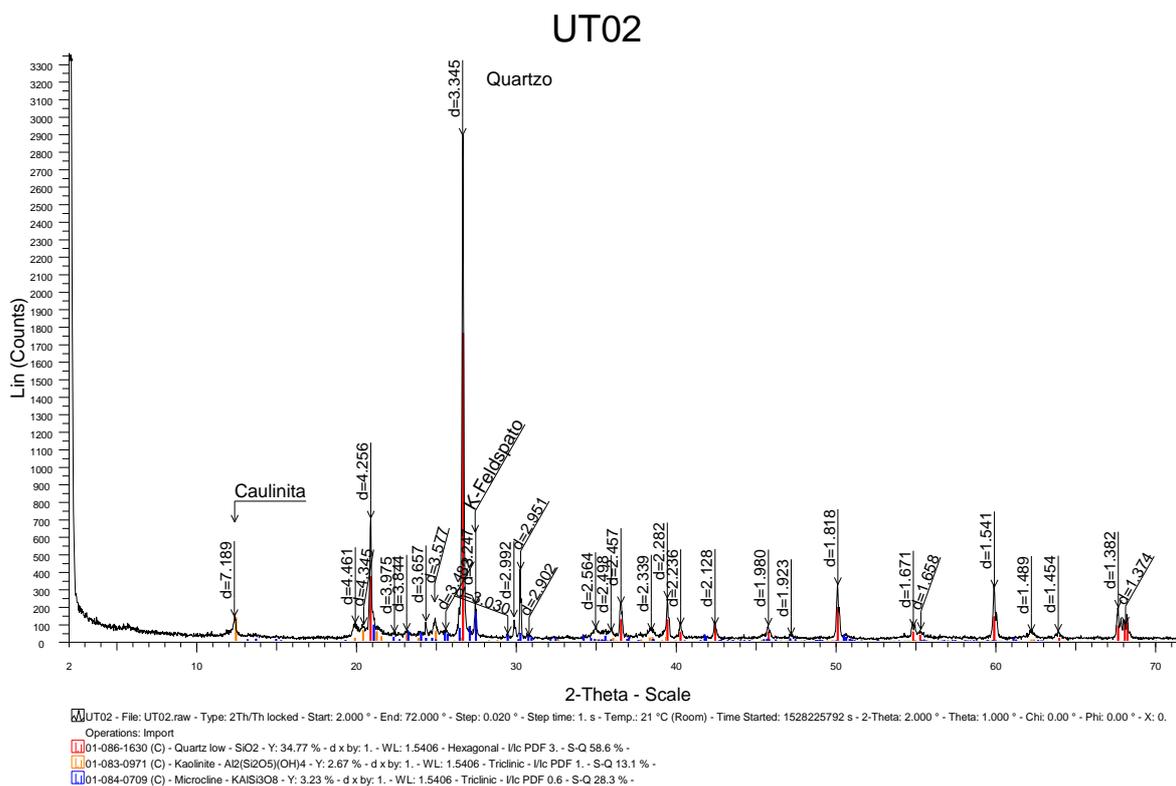
TAKENO, N. **Atlas of Eh-pH diagrams:** intercomparison of thermodynamic databases. [S.l.]: [s.n.], 2005.

TORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, p. 55-94, 1948.

USDA. **Soil Quality Indicators: Soil Nitrate.** Natural Resources Conservation Service. [S.l.]. 2014.

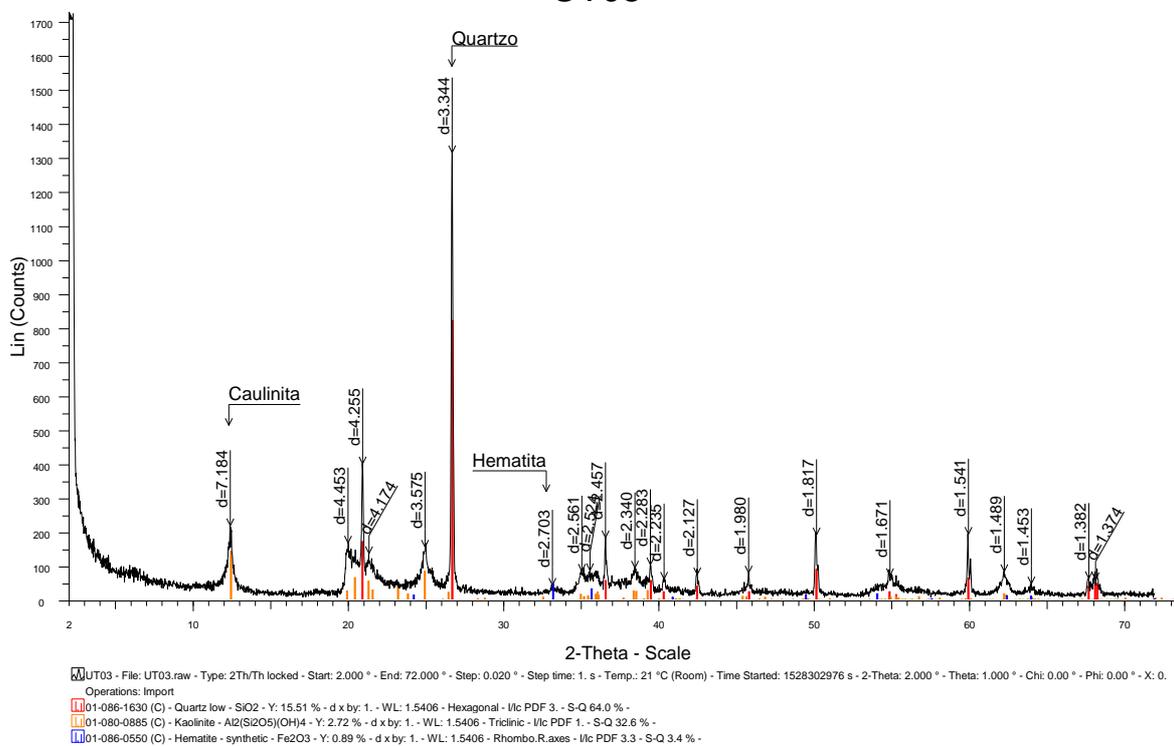
ANEXOS

Anexo I – Difratoograma da amostra UT-02.



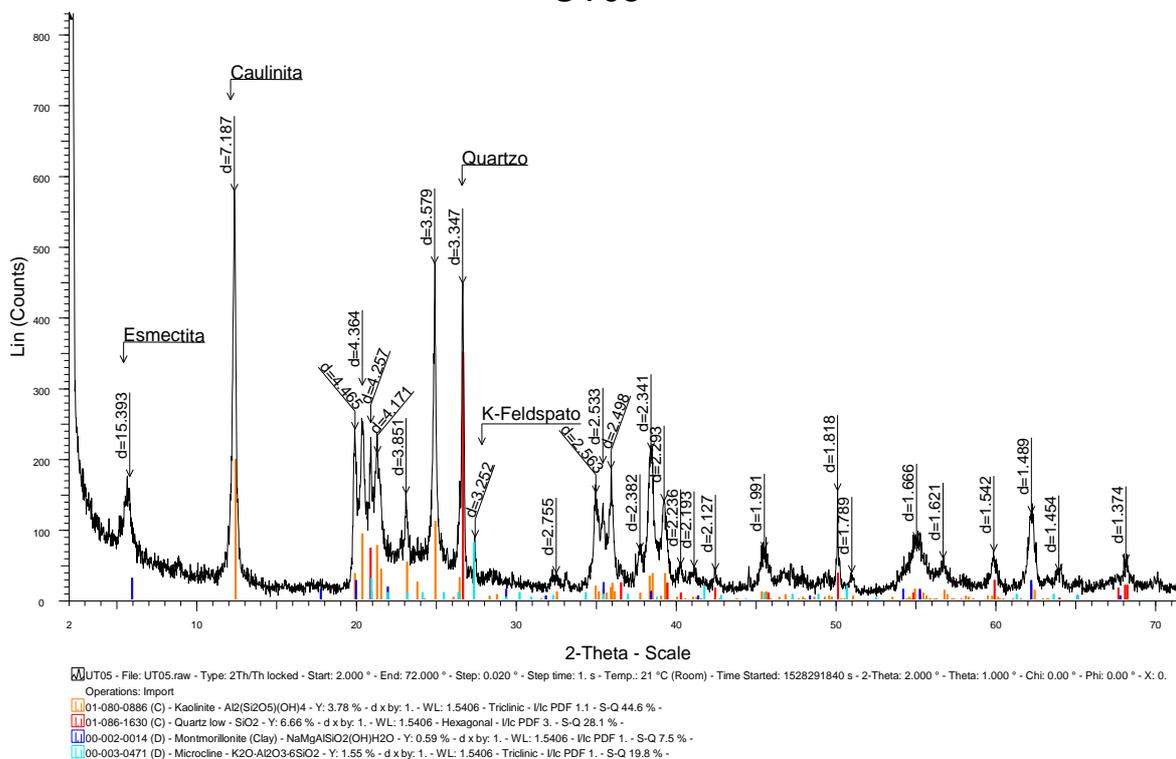
Anexo II – Difratoograma da amostra UT-03.

UT03

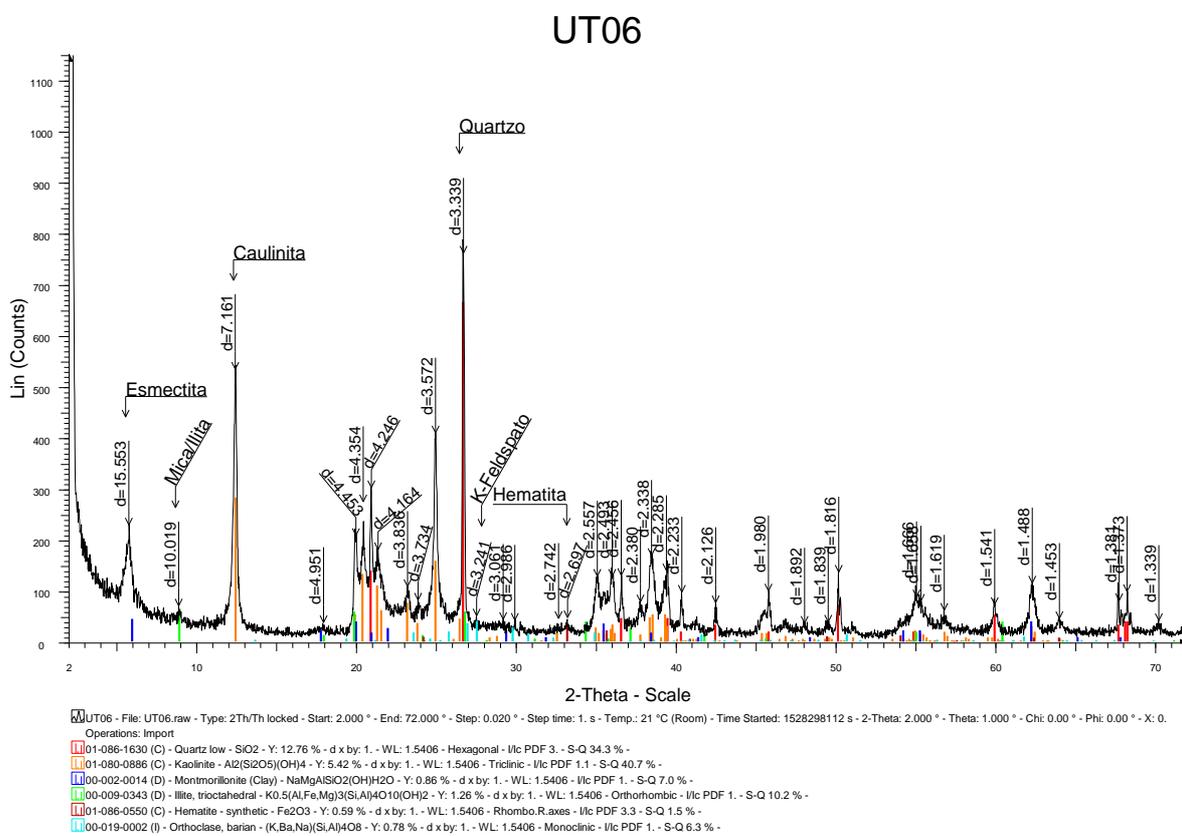


Anexo III – Difratoograma da amostra UT-05.

UT05



Anexo IV – Difractograma da amostra UT-06.



Anexo V – Precipitação e temperaturas médias mensais calculadas para o período de 1991 a 2017.

	PPT média (mm)	Temperatura média (°C)
Janeiro	106	24,95
Fevereiro	110	24,7
Março	79,666667	23,45
Abril	94	20,57
Mai	84,33	17,02
Junho	168,5	14,6
Julho	109,38	14,07
Agosto	120,46	15,78
Setembro	119,47	17,08
Outubro	101,46	19,74
Novembro	67,69	21,67
Dezembro	123,26	23,8
Média Anual	-	19,79

Anexo VI – Valores de “I” e “a” calculados com base no método de Thornthwaite, e a evapotranspiração mensal resultante.

Método de Thornthwaite (mm/mês)			
i (jan)	11,40051		
i (fev)	11,22801	ETP (jan)	118,6149
i (mar)	10,379	ETP (fev)	116,0897
i (abr)	8,511305	ETP (mar)	103,8963
i (mai)	6,38899	ETP (abr)	78,52305
i(jun)	5,065119	ETP (mai)	52,38316
i(jul)	4,789351	ETP (jun)	37,74556
i (ago)	5,697619	ETP (jul)	34,87798
i (set)	6,42312	ETP (ago)	44,56481
i (out)	7,996777	ETP (set)	52,77854
i (nov)	9,209792	ETP (out)	71,90775
i (dez)	10,61444	ETP (nov)	87,7691
I	97,70403	ETP (dez)	107,2379
a=	2,136809		

Anexo VII – Balanço hídrico para cada uma das unidades geológicas presentes na área de estudo, onde:

PPT – Precipitação total

PPU – Precipitação útil

DEF – Deflúvio

EVT – Evapotranspiração

Sítio Sanga do Cabral	MÊS	PPT	DEF	PPU	EVT	PPU - EVT	ÁGUA PARA RECARGA (mm/ano)
	Janeiro	106	27	80	119	-39	0
	Fevereiro	110	28	83	116	-34	0
	Março	80	20	60	104	-44	0
	Abril	94	24	71	79	-8	0
	Maio	84	21	63	52	11	11
	Junho	169	42	126	38	89	89
	Julho	109	27	82	35	47	47
	Agosto	120	30	90	45	46	46
	Setembro	119	30	90	53	37	37
	Outubro	101	25	76	72	4	4
	Novembro	68	17	51	88	-37	0
	Dezembro	123	31	92	107	-15	0
TOTAL							233

Arenito Sanga do Cabral	MÊS	PPT	DEF	PPU	EVT	PPU-EVT	ÁGUA PARA RECARGA (mm/ano)
	Janeiro	106	21	85	119	-34	0
	Fevereiro	110	22	88	116	-28	0
	Março	80	16	64	104	-40	0
	Abril	94	19	75	79	-3	0
	Maio	84	17	67	52	15	15
	Junho	169	34	135	38	97	97
	Julho	109	22	88	35	53	53
	Agosto	120	24	96	45	52	52
	Setembro	119	24	96	53	43	43
	Outubro	101	20	81	72	9	9
	Novembro	68	14	54	88	-34	0
	Dezembro	123	25	99	107	-9	0
TOTAL							269

Sedimentos Cenozoicos	MÊS	PPT	DEF	PPU	EVT	PPU-EVT	ÁGUA PARA RECARGA (mm/ano)
	Janeiro	106	16	90	119	-29	0
	Fevereiro	110	17	94	116	-23	0
	Março	80	12	68	104	-36	0
	Abril	94	14	80	79	1	1
	Maiο	84	13	72	52	19	19
	Junho	169	25	143	38	105	105
	Julho	109	16	93	35	58	58
	Agosto	120	18	102	45	58	58
	Setembro	119	18	102	53	49	49
	Outubro	101	15	86	72	14	14
	Novembro	68	10	58	88	-30	0
	Dezembro	123	18	105	107	-2	0
TOTAL							305