

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
DEPARTAMENTO DE MINERALOGIA E PETROLOGIA

**AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CONTAMINAÇÃO NO DEPÓSITO DE
REJEITOS E CINZAS DE CARVÃO A SUL DA ÁREA DE PRESERVAÇÃO
AMBIENTAL DO CAPÃO DA ROÇA NO MUNICÍPIO DE CHARQUEADAS/RS**

GUILHERME D'ÁVILA NUNES

PORTO ALEGRE
2020

GUILHERME D'ÁVILA NUNES

AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CONTAMINAÇÃO NO DEPÓSITO DE REJEITOS
E CINZAS DE CARVÃO A SUL DA ÁREA DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL DO
CAPÃO DA ROÇA NO MUNICÍPIO DE CHARQUEADAS/RS

Projeto Temático em Geologia III apresentado na forma de monografia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Prof. Dr. Antônio Pedro Viero
Prof^a. Dr^a. Maria Luiza Correa da Camara Rosa

Supervisor: Maiquel Kochhann Lunkes

PORTO ALEGRE

2020

CIP - Catalogação na Publicação

Nunes, Guilherme
AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CONTAMINAÇÃO NO DEPÓSITO
DE REJEITOS E CINZAS DE CARVÃO A SUL DA ÁREA DE
PRESERVAÇÃO AMBIENTAL DO CAPÃO DA ROÇA NO MUNICÍPIO DE
CHARQUEADAS/RS / Guilherme Nunes. -- 2020.
149 f.
Orientadores: Antônio Pedro Viero, Maria Luíza
Correa da Camara Rosa.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2020.

1. Capão da Roça. 2. Caminhamentos elétricos. 3.
Contaminação por DAM (drenagem ácida de mina). I.
Viero, Antônio Pedro, orient. II. Correa da Camara
Rosa, Maria Luíza, orient. III. Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CONTAMINAÇÃO NO DEPÓSITO DE REJEITOS E CINZAS DE CARVÃO A SUL DA ÁREA DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL DO CAPÃO DA ROÇA NO MUNICÍPIO DE CHARQUEADAS/RS, elaborado por GUILHERME D'ÁVILA NUNES como requisito parcial do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

Prof. Dr. Pedro Antonio Roehe Reginato

Profª Drª. Taís Freitas da Silva

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, obrigado à minha mãe Inês Suzete Silveira D'Ávila e ao meu pai Valmir da Silva Nunes. A eles que sempre estiveram ao meu lado nos momentos difíceis e a quem devo grande parte do que sou. Aos meus irmãos, Henrique D'Ávila Nunes e Bernardo Manique Nunes, meus eternos amigos cujo carinho intrínseco sempre carregarei comigo. Às minhas avós, tios, primos e demais familiares que sempre estiveram ao meu lado.

Dirijo também os meus agradecimentos aos meus orientadores Prof Dr. Antônio Pedro Viero e Prof^a. Dr^a. Maria Luiza Correa da Camara Rosa, bem como ao meu supervisor, Maiquel Kochhann Lunkes por me dar o suporte que necessitei para a elaboração deste trabalho, que é um marco de grande importância na minha experiência profissional e que, por isso, será sempre lembrado por mim.

Aos desafios que tive que me tornaram um homem melhor do que já fui no passado.

À minha querida amiga, Gabriele, que me mostrou que uma amizade pode permanecer igual independente do tempo e da distância.

À Mariana, Ana e Flora, por junto comigo formarem a melhor Faixa 1 do Mapeamento da História e por serem as irmãs mulheres que não tive.

Ao Rodrigo, Schimba e Sommer e Maurício pela irmandade além do sangue.

À Júlia pelo "O quê? O quê?", à Marília, minha prima e companheira de curso, ao Souza, Cristiano, Kenji, Alemão, Chico, Jojo e Anderson pela amizade, amor e companheirismo.

À Amanda, Gerônimo, Cíntia, Andrei, Elisa, Larissa e Victor, os Ruthes, por serem o melhor grupo de amigos que alguém poderia ter e que mudaram minha forma de ver a amizade.

Ao Gomes e ao Jefferson, amigos desde o primeiro dia de UFRGS que guardarei até o fim de minha vida.

À Marila pela amizade e companheirismo ao longo de anos da minha vida.

À Dra. Marina por me acompanhar, sempre que necessitei dela, em toda a minha trajetória de vida.

À Petra, à ABG e à Geoprospec por terem me proporcionado experiências riquíssimas profissionais fora da academia.

À Copelmi Mineração por ter permitido que este trabalho fosse realizado em seus domínios e seu corpo de profissionais incríveis, especialmente o geólogo Gustavo Bastiani, a química Daniela da Silva e supervisora Ieda Dorneles, que sempre estiveram lá para esclarecer dúvidas ou fornecer algum dado que necessitei.

Também agradeço ao PAP da Corsan e seus funcionários por disponibilizar o equipamento para a realização dos caminhamentos elétricos.

E, por fim, agradeço à UFRGS, local onde vivi, cresci e me desenvolvi. Obrigado a esta universidade por me dar um ensino público de qualidade. Obrigado a esta universidade que me proporcionou vivências incríveis, me mostrando mundos e realidades além dos que eu conhecia, permitindo que me desenvolvesse, não só no campo profissional, mas também em todos os outros campos que compõem o indivíduo. E acima de tudo, obrigado a esta universidade por me aproximar de pessoas incríveis, muitos dos quais se tornaram amigos para a vida e que fizeram dos anos de graduação os melhores anos de minha vida.

“Ninguém pode entrar duas vezes no mesmo rio, pois quando nele se entra novamente, não se encontram nele as mesmas águas, e o próprio ser já se modificou.”

Heráclito

RESUMO

Os rejeitos que compõem o depósito de carvão e cinzas localizado a sul da área de preservação do Capão da Roça, em Charqueadas/RS, foram dispostos sobre uma área ambientalmente frágil, com lençol freático próximo à superfície e cujo substrato é formado majoritariamente por sedimentos inconsolidados que intercalam sedimentos de granulometria fina com sedimentos de granulometria grossa, conforme estudos anteriores. Tais rejeitos foram dispostos no início da década de 90 e a área em que os mesmos encontram-se foi remediada a partir da disposição de solo sobre o local. Contudo, desde então, tais rejeitos que compõem o depósito, têm sido lixiviados por águas pluviais de forma a contaminar as águas subterrâneas. O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a evolução da contaminação junto ao depósito de rejeitos e cinzas de carvão. Para isso foram realizados estudos geofísicos que consistiram na execução de dois caminhamentos elétricos que foram comparados com caminhamentos elétricos realizados na década anterior como forma de avaliar a variação da intensidade da contaminação ao longo do tempo. Além disso, como forma direta de avaliação da contaminação, o presente estudo baseou-se em dados de monitoramento de águas subterrâneas e efluentes de aproximadamente uma década fornecidos pela empresa que realiza a gestão do depósito. Os dados de monitoramento de águas subterrâneas e de efluentes associados aos dados dos caminhamentos elétricos mostram que as concentrações de alguns dos principais parâmetros associados a DAM vêm diminuindo ao longo do tempo, mas que isso pouco se reflete quantitativamente na condutividade elétrica do substrato. Além disso, também é observado que provavelmente a contaminação das águas subterrâneas sob o depósito de rejeitos está limitada apenas até os primeiros 10 metros de profundidade.

Palavras-chave: Capão da Roça, Caminhamentos elétricos, Contaminação por DAM (drenagem ácida de mina)

ABSTRACT

The mine tailings that compose the coal and ash deposit located at south of the Capão da Roça preservation area, in Charqueadas / RS, were disposed within an environmentally fragile area, with groundwater close to the surface and whose substrate is formed mostly by unconsolidated sediments that intercalate fine-grained sediments with coarse-grained sediments, as shown by previous studies. The disposition of the tailings occurred in the early 90s and the area in which they are found has been remedied from the disposal of soil on the site. However, since then, the mine tailings that fill the deposit have been leached by rainwater, which contaminate the groundwater. Therefore, the main objective of the present work is evaluating the evolution of the contamination in the deposit of mine tailings and coal ash within the area of Capão da Roça, in Charqueadas. With this intention, geophysical studies were carried out. They consisted of the execution of two electrical profilings which were compared with electrical profilings carried out along the previous decade as a way to assess the variation in the intensity of contamination over time. As a direct way of assessing contamination, the present work was based on monitoring data for groundwater and effluents obtained during the previous decade, provided by the company that manages the deposit. The groundwater and effluent monitoring data associated with data obtained by electrical profilings show that the concentrations of some of the main parameters associated with AMD have been decreasing over time, but that is not reflected quantitatively in the electrical conductivity of the substrate. In addition, it was also observed that the contamination of groundwater under the tailings deposit is likely to be limited only to the first 10 meters of depth.

Key-words: Capão da Roça, Electrical profiling, contamination by AMD (acid mine drainage).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização do depósito de rejeitos de carvão e cinzas na localidade do Capão da Roça (polígono vermelho) e sua posição em relação ao Município de Charqueadas (polígono verde) e o Estado do Rio Grande do Sul (polígono cinza).	15
Figura 2. Imagem de satélite de 2019 com localização do depósito de rejeito de carvão e cinzas. (Google Earth, 2019).....	16
Figura 3. Unidades litoestratigráficas que ocorrem na região da área de estudo (Wildner <i>et al.</i> , 2008).	20
Figura 4. Disposição dos poços de monitoramento existentes no ano de 1997 (Binotto, 1997).27	
Figura 5. Perfis geológicos dos poços P1, P2 e P3, instalados por Binotto (1997), dentro do depósito de rejeitos.....	28
Figura 6. Perfis geológicos dos poços P4, P5 e P6, instalados por Binotto (1997).	29
Figura 7. Perfis geológicos dos poços P7 e P8 instalados por Binotto (1997).	30
Figura 8. Mapa potenciométrico elaborado (Binotto, 1997).....	31
Figura 9. Caminhamentos realizados por Stevanato & Spinelli em 2008.....	34
Figura 10.Pseudosseção resultante dos caminhamento elétrico denominado Linha 02 realizados pela empresa Intergeo (Stevanatto e Spinelli, 2008)	36
Figura 11. Pseudosseção resultante dos caminhamento elétrico denominado Linha 04 realizados pela empresa Intergeo (Stevanatto e Spinelli, 2008)	37
Figura 12. Mapa de localização dos poços de monitoramento que existem atualmente nas imediações do aterro e poços de monitoramento instalados por Binotto (1997), hoje tamponados.	40
Figura 13. Perfil geológico e construtivo do poço de monitoramento CR01 (poço a montante do depósito de rejeito de carvão e cinzas) com nível d'água na cota 15,47 m de prof (Copelmi, 2020).	41
Figura 14. Perfil geológico e construtivo do poço de monitoramento CR02 (poço a jusante do depósito de rejeito de carvão e cinzas) com nível d'água na cota 11,27 m de prof (Copelmi, 2020)	42
Figura 15. Perfil geológico e construtivo do poço de monitoramento CR03 (poço instalado dentro do depósito de rejeito de carvão e cinzas) com nível d'água na cota de 14,64 m de profundidade.....	43
Figura 16. Pontos de coleta de efluentes gerados pelo depósito de rejeitos.....	45
Figura 17. Intervalo estimado para valores de resistividade de determinados componentes em subsolo (Kearey <i>et al.</i> , 2009)	48
Figura 18. Procedimento do caminhamento elétrico em arranjo dipolo-dipolo indicando os eletrodos de corrente AB, de potencial MN, linhas de corrente, de potencial e níveis de investigação (Stevanato e Spinelli, 2008).	51
Figura 19. Representação de uma pseudoseção de medidas de um caminhamento elétrico (Stevanato e Spinelli, 2008).	52

Figura 20. Posição dos caminhamentos realizados em 2019 em relação aos limites do depósito de rejeito e aos poços instalados por Binotto em 1997.	54
Figura 21. Perfil de elevação do caminhamento CE01 obtido junto ao software Google Earth Pro.	55
Figura 22. Perfil de elevação do caminhamento CE02 obtido junto ao software Google Earth Pro.	56
Figura 23. Planta topográfica em escala 1:5.000 disponibilizada por Copelmi Ltda.(Copelmi, 2020)	57
Figura 24. Resistivímetro SuperSting R1/IP, disponibilizado pela Corsan.	58
Figura 25. Anotação dos dados dos caminhamentos elétricos apresentados junto ao resistivímetro.	58
Figura 26. Modelo de células (ou blocos) utilizado pelo software Res2Dinv (Geotomo, 2007) ..	60
Figura 27. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	77
Figura 28. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	77
Figura 29. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	77
Figura 30. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	78
Figura 31. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	78
Figura 32. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	78
Figura 33. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	79

Figura 34. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	79
Figura 35. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	79
Figura 36. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.	80
Figura 37. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.	80
Figura 38. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.	80
Figura 39. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.	81
Figura 40. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.	81
Figura 41. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.	81
Figura 42. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de STD realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	82
Figura 43. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de STD realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	82

Figura 44. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de STD realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	82
Figura 45. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	83
Figura 46. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	83
Figura 47. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	83
Figura 48. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO ₃	84
Figura 49. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO ₃	84
Figura 50. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO ₃	84
Figura 51. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe total realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	87
Figura 52. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe total realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os <i>outliers</i> (valores de outubro de 2008 e outubro de 2010, 91,5 mg/L e 10,9 mg/L, respectivamente) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	87
Figura 53. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe total realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação	

com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	87
Figura 54. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	88
Figura 55. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os <i>outliers</i> (valor de outubro de 2008, de 2,42 mg/L) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	88
Figura 56. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	88
Figura 57. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	89
Figura 58. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os <i>outliers</i> (valor de outubro de 2008, de 2,42 mg/L) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	89
Figura 59. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.	89
Figura 60. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.	90
Figura 61. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.	90
Figura 62. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.	91

- Figura 63. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH. 91
- Figura 64. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) retirados os *outliers* (valor de abril de 2013, de 6,98) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L. 91
- Figura 65. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sólidos totais dissolvidos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L. 92
- Figura 66. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sólidos totais dissolvidos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L. 92
- Figura 67. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L. 93
- Figura 68. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L. 93
- Figura 69. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃. 94
- Figura 70. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os *outliers* (valor de outubro de 2010, de 502 mg/L CaCO₃) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃. 94
- Figura 71. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃. 94

Figura 72. Caminhamentos realizados no presente estudo em 2019, em relação ao depósito de rejeitos e aos caminhamentos de Stevanato & Spinelli (2008).	97
Figura 73. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 6 níveis de medição obtidos no Caminhamento 01, realizado em 2019 para o presente estudo.	99
Figura 74. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 3 níveis de medição obtidos no Caminhamento 01, realizado em 2019 para o presente estudo.	99
Figura 75. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 6 níveis de medição obtidos no Caminhamento 02, realizado em 2019 para o presente estudo.	100
Figura 76. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 3 níveis de medição obtidos no Caminhamento 02, realizado em 2019 para o presente estudo.	100
Figura 77. Correlação entre os CEs 01 e 02 realizados em 2019, para o presente estudo, em relação às linhas de caminhamentos de Intergeo (Stevanatto e Spinelli, 2008) e os marcadores de distâncias das Linhas 02 e 04 que delimitam os trecho a serem comparados com os caminhamentos recentes.....	103
Figura 78. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 6 níveis de medição entre às distâncias de 140 m a 460 m da Linha 02 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao <i>software</i> Res2Dinv vers 3.56.	105
Figura 79. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 3 primeiros níveis de medição entre às distâncias de 140 m a 460 m da Linha 02 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao <i>software</i> Res2Dinv vers 3.56.	105
Figura 80. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 6 níveis de medição entre às distâncias de 400 m a 920 m da Linha 04 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao <i>software</i> Res2Dinv vers 3.56.	106
Figura 81. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 3 primeiros níveis de medição entre às distâncias de 400 m a 920 m da Linha 04 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao <i>software</i> Res2Dinv vers 3.56.	106
Figura 82. Classificação das isocurvas de resistividade dos caminhamentos elétricos disponíveis nas Figura 73 à Figura 76 e Figura 78 à Figura 81.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados das determinações dos teores de cinzas, Stot, Ctot e pH inicial de Binotto (1997).	25
Tabela 2. Informações referentes aos caminhamentos de Stevanato e Spinelli (2008).	33
Tabela 3. Coordenadas dos poços de monitoramento atualmente existentes na localidade do Capão da Roça.....	39
Tabela 4. Análises de água subterrânea do poço de monitoramento CR01 sendo os metais apresentados, medidos na forma de metais totais.....	63
Tabela 5. Análises de água subterrânea do poço de monitoramento CR02 sendo os metais apresentados, medidos na forma de metais totais.....	64
Tabela 6. Análises de água subterrânea do poço de monitoramento CR03 sendo os metais apresentados, medidos na forma de metais totais.....	65
Tabela 7. Comparação entre análises químicas e físico- químicas de águas subterrâneas do poço de Binotto (1997) a montante do depósito com o poço CR01, e sua relação com os valores máximos permitidos menos conservadores (número em vermelho) e mais conservadores (número e quadro em vermelho) do Conama nº 396/2008.	71
Tabela 8. Comparação entre análises químicas e físico-químicas de águas subterrâneas dos poços de Binotto (1997) a jusante do depósito com o poço CR02, e sua relação com os valores máximos permitidos menos conservadores (número em vermelho) e mais conservadores (número e quadro em vermelho) do Conama nº 396/2008.	72
Tabela 9. Comparação entre análises químicas e físico-químicas de águas subterrâneas dos poços de Binotto (1997) a dentro do depósito com o poço CR03, e sua relação com os valores máximos permitidos menos conservadores (número em vermelho) e mais conservadores (número e quadro em vermelho) do Conama nº 396/2008.	73
Tabela 10. Precipitação Total Mensal em mm entre os anos de 2008 e 2019.	75
Tabela 11. Máximas, mínimas, média de precipitação para cada mês do ano dos meses entre os anos de 2008 e 2018 e o desvio padrão de cada mês neste período.....	75
Tabela 12. Posições iniciais e finais dos caminhamentos realizados pelo presente estudo em 2019, junto ao depósito de rejeitos e cinzas.	98
Tabela 13. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico CE01 realizado em 2019 para o presente estudo.	109
Tabela 14. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico CE02 realizado em 2019 para o presente estudo.	110
Tabela 15. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico L02 realizado em 2008 por Setevanatto e Spinelli.	111

Tabela 16. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico L02 realizado em 2008 por Setevanatto e Spinelli.	112
Tabela 17. Resultados das análises físico-químicas e químicas dos efluentes do ponto de amostragem CR07 com <i>outliers</i> retirados dos graficos das Figura 51, Figura 52, Figura 54, Figura 55, Figura 57, Figura 58, Figura 69 e Figura 70 assinalados em vermelho.	129
Tabela 18. Resultados das análises físico-químicas e químicas dos efluentes do ponto de amostragem CR12 <i>outliers</i> retirados dos graficos das Figura 63 e Figura 64 assinalados em vermelho.....	133
Tabela 19. Resultados obtidos junto ao caminhamento elétrico 01.	138
Tabela 20. Resultados obtidos junto ao caminhamento elétrico 02.	140

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	17
2 ESTADO DA ARTE	18
2.1 GEOLOGIA DA REGIÃO DE ESTUDO	18
2.2 CLIMA REGIONAL.....	20
2.3. CARVÃO NO RIO GRANDE DO SUL.....	21
2.4. CONTAMINAÇÃO POR REJEITO DE CARVÃO E CINZAS DE CARVÃO	22
2.5 ESTUDOS SOBRE A CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CAPÃO DA ROÇA	24
2.5.1 Caracterização dos rejeitos do depósito do Capão da Roça	24
2.5.2. Geofísica – Método eletromagnético EM34-3.....	26
2.5.3. Poços de monitoramento e mapa potenciométrico	26
2.5.4 Análises físico-químicas de águas subterrâneas.....	31
2.6 ESTUDOS DE ELETRORRESISTIVIDADE NO CAPÃO DA ROÇA.....	33
2.7 CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ATUAL DO DEPÓSITO DE REJEITOS E CINZA DE CARVÃO	38
3 METODOLOGIA	46
3.1 ETAPA PRÉ-CAMPO.....	46
3.1.1 Dados químicas e físico-químicas das águas subterrâneas e efluentes....	46
3.2 ETAPA DE CAMPO	47
3.2.1 Eletrorresistividade e caminhamentos elétricos	47
3.2.1.1 Método de eletrorresistividade aplicado à contaminação	49
3.2.1.3 Caminhamentos Elétricos (CE) e aplicação junto à área de estudo....	50
3.3 ETAPA PÓS-CAMPO	59

4 RESULTADOS	62
4.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E QUÍMICAS DE ÁGUAS	62
4.2 PRECIPITAÇÃO TOTAL MENSAL	74
4.3 VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS ASSOCIADOS À DAM NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO CAPÃO DA ROÇA.....	76
4.4. VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS ASSOCIADOS À DAM NOS EFLUENTES DO CAPÃO DA ROÇA	86
4.5 CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS	97
5 DISCUSSÕES	114
5.1 ANÁLISES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E DE EFLUENTES	114
5.2 CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS	118
6 CONCLUSÕES	122
7 REFERÊNCIAS	124
8 ANEXOS	127
ANEXO 1 – Análises de efluentes do Capão da Roça.....	128
Tabela 17. Resultados das análises físico-químicas e químicas dos efluentes do ponto de amostragem CR07 com <i>outliers</i> retirados dos graficos das Figura 49, Figura 50, Figura 52, Figura 53, Figura 55, Figura 56, Figura 67 e Figura 68 assinalados em vermelho.	129
Tabela 18. Resultados das análises físico-químicas e químicas dos efluentes do ponto de amostragem CR12 <i>outliers</i> retirados dos graficos das Figura 61 e Figura 62 assinalados em vermelho.	133
ANEXO 2 – Resultados dos caminhamentos elétricos.	137
Tabela 19. Resultados obtidos junto ao caminhamento elétrico 01.....	138
Tabela 20. Resultados obtidos junto ao caminhamento elétrico 02.....	140

1 INTRODUÇÃO

Na região sul do Brasil, em especial nos estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o uso do carvão mineral tem sido uma importante forma de geração de energia e, conseqüentemente, uma matéria prima de grande relevância econômica. Contudo, em função da ausência de leis mais rígidas e de um melhor auxílio das autoridades competentes, houve, nas décadas de 80 e 90, falhas no que se refere ao manejo e destinação dos rejeitos produzidos ao longo do tempo pela queima deste material. Esta lacuna gerou a formação de diversos depósitos de rejeitos, que, por vezes, não foram dispostos da forma e nos locais mais adequados e que atualmente são um problema sob o ponto de vista da preservação do meio ambiente nas regiões em que eles se encontram.

Uma das regiões afetadas com este tipo de passivo ambiental é a região carbonífera de Charqueadas e São Jerônimo/RS e que, ao longo dos anos, tem sido objeto de importantes trabalhos técnicos e acadêmicos de caráter ambiental. Em geral, estes trabalhos têm como objetivo pesquisar a contaminação de áreas localizadas nessa região que durante muito tempo foi usada como depósitos de rejeito e cinzas de carvão. Segundo relato de Binotto (1997), autora de um dos mais relevantes trabalhos publicados envolvendo essa localidade, tais depósitos eram “dispostos em locais pouco propícios pelas empresas que produziam este rejeito, que sem um maior auxílio das autoridades competentes eram escolhidos principalmente sob o ponto de vista econômico”.

De acordo com Copelmi (1994), são cinco as principais áreas de deposição de rejeito da região em questão, de maneira que o presente trabalho visa estudar a área denominada Área III, disposta a sul da área de conservação denominada Capão da Roça, em Charqueadas/RS. Nesta área, Binotto (1997) registrou a presença de contaminação junto ao lençol freático por meio de análises químicas e por meio de métodos eletromagnéticos.

Tendo em vista o potencial impacto ambiental neste local, conforme indicado no trabalho de Binotto (1997), causado pela contaminação por rejeito de carvão, pretende-se neste trabalho, contribuir com os conhecimentos acerca da evolução da contaminação do aquífero na área do Capão da Roça, lançando mão de caminhamentos elétricos como forma de mensurar o grau de contaminação das

águas. Os caminhamentos realizados no presente estudo serão comparados a caminhamentos anteriores realizados em trabalhos de cunho técnico no depósito do Capão da Roça de forma a avaliar a evolução da contaminação ao longo do tempo. Além disso, em se tratando de um método indireto de avaliação de contaminação, tais caminhamentos elétricos serão orientados por dados de análises de água subterrânea e de efluentes, realizadas entre os anos de 2008 a 2019.

1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O objeto do presente estudo é um depósito de rejeitos de carvão e cinzas de carvão localizado a sul da área do Capão da Roça, no município de Charqueadas/RS, na porção centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 38 km da capital, Porto Alegre (Figura 1 e Figura 2).

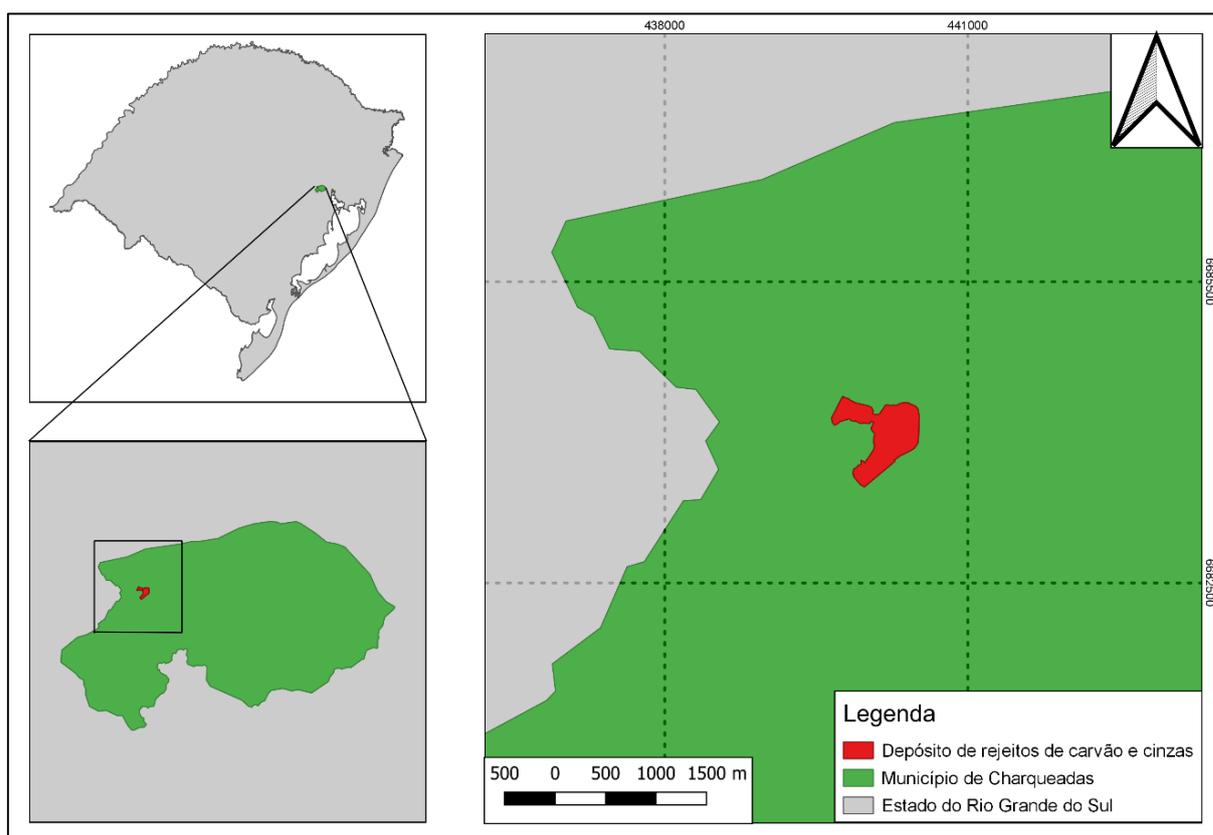


Figura 1. Mapa de localização do depósito de rejeitos de carvão e cinzas na localidade do Capão da Roça (polígono vermelho) e sua posição em relação ao Município de Charqueadas (polígono verde) e o Estado do Rio Grande do Sul (polígono cinza).



Figura 2. Imagem de satélite de 2019 com localização do depósito de rejeito de carvão e cinzas. (Google Earth, 2019)

Como é possível observar na Figura 2, a área em questão encontra-se próxima a áreas urbanas e edificadas e, em parte, está sendo objeto de loteamento na porção noroeste.

1.2 JUSTIFICATIVA

De maneira geral, qualquer tipo de estudo que vise fornecer informações referentes a qualquer tipo de contaminação, são de interesse público, já que, conforme previsto na Constituição Federal em seu Art. 225, “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida”.

Soma-se a isso, o fato de que o crescimento populacional vem aumentando o consumo de água e conseqüentemente a demanda por novas reservas de água potável. Grande parte desta água potável se encontra em subsuperfície, sendo o gerenciamento de águas subterrâneas imprescindível, para que se mantenha o cuidado perante à contaminação de aquíferos em relação a ações antrópicas.

Neste contexto, trabalhos como este são relevantes, visto que fornecer informações sobre a evolução acerca de uma área contaminada pode auxiliar na tomada de decisões para medidas efetivas de mitigação.

Por fim, também ressalta-se que o depósito em questão encontra-se na área urbana do Município de Charqueadas, o que por sua vez, aumenta o risco para a saúde humana.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho visa determinar por meio de métodos diretos (interpretação de análises físico-químicas e químicas de águas) e métodos indiretos (caminhamentos elétricos) observar a evolução da contaminação gerada pelo depósito de rejeito e cinzas de carvão a sul da área do Capão da Roça, no município de Charqueadas/RS, em relação ao trabalho anteriormente realizado naquela região feitos por Binotto et al. (1997) e Stevanato e Spinelli (2008).

Os caminhamentos elétricos têm como objetivo estimar a intensidade da contaminação dentro do depósito de rejeitos a partir de caminhamentos elétricos realizados em concordância com caminhamentos anteriormente realizados (Stevanato e Spinelli, 2008) de forma a permitir a comparação entre a resistividade atual do meio e a observada dez anos atrás. Além disso, serão utilizadas as análises físico-químicas das águas do aquífero obtidas em monitoramentos semestrais realizadas e fornecidas pela empresa Copelmi, para a caracterização da evolução da contaminação. Dessa forma, o presente trabalho também tem como finalidade fornecer informações atualizadas que possibilitem melhorias no processo de gerenciamento e, se necessário a contenção da contaminação em questão, além de auxiliar na elaboração de futuros estudos de contaminação de aquíferos.

Para tanto, são propostas as subseqüentes metas:

- Execução de caminhamentos geoeletricos longitudinais e transversais à pluma de contaminação;
- Identificação da intensidade e evolução da contaminação a partir da comparação com caminhamentos anteriores;
- Análise e interpretação dos dados de monitoramento.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 GEOLOGIA DA REGIÃO DE ESTUDO

Segundo Petri & Fúlfaro (1983) a Bacia do Paraná é um dos clássicos exemplos de grandes bacias intracratônicas globais. Tal bacia ocupa a região centro-oeste do continente sul-americano com aproximadamente 1.600.000 km² de extensão, sendo que 1.000.000 km² está situada no Brasil e os outros 600.000 km² divididos entre Uruguai, Paraguai e Argentina. No território brasileiro ela abrange a maior parte de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul além de uma pequena porção do sudoeste de Minas Gerais. Segundo Zalán et al. (1990), cerca de dois terços da bacia em território brasileiro são recobertos por derrames de lava basáltica os quais podem atingir até 1.700 m de espessura. A morfologia da bacia pode ser descrita como detentora de um formato alongado de direção NNW-SSE chegando a 1.750 km de comprimento. Segundo registros a maior espessura da bacia é de 8.000 m.

O primeiro trabalho mais aprofundado sobre a estratigrafia da Bacia do Paraná foi publicado por White em seu Relatório sobre as reservas de carvão e rochas associadas no sul do Brasil em 1908. Desde então, inúmeros foram os trabalhos publicados que buscavam desenvolver os conhecimentos referentes a este tema. Ressaltam-se entre inúmeras publicações, alguns trabalhos como dos de Scheneider et al. (1974), Fúlfaro et al. (1980), Milani (1997) e Milani et al. (2007).

Conforme Milani & Ramos (1998) a Bacia do Paraná é uma ampla região de sedimentação que evoluiu ao longo do Paleozóico e o Mesozóico e que contém um registro de rochas do Neo-Ordoviciano ao Neocretáceo, resultando em uma sedimentação de aproximadamente 400 milhões de anos desta região. Ela é dividida em seis supersequências definidas por superfícies de descontinuidade (Milani 1997 apud Milani & Ramos, 1998) sendo estas Rio Ivaí (Caradociano-Landoveriano), Paraná (Lockoviano-Frasniano), Gondwana I (Westfaliano-Scythiano), Gondwana II (Anisiano-Noriano), Gondwana III (Neojurássico-Berriasiano) e Bauru (Aptiano-Maestrichtiano).

De acordo com mapeamento de CPRM (Wildner *et al.*, 2008), as formações da Bacia do Paraná encontradas no estado do Rio Grande do Sul são Formação Taciba pertencente ao Grupo Itararé, Formações Palermo e Rio Bonito pertencentes ao Grupo Guatá, Formações Irati, Estrada Nova, Rio do Rasto e Pirambóia pertencentes ao Grupo Passa Dois, Formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita do Grupo

Rosário do Sul e Formações Sanga do Cabral, Guará, Botucatu e Serra Geral do Grupo São Bento.

A área do depósito em questão, segundo interpretação de Copelmi (1994) está disposta sobre a unidade de depósitos aluvionares. De maneira geral, tais depósitos são aqueles formados junto a planícies de inundação de rios por sedimentos clásticos inconsolidados

Tais depósitos podem ser subdivididos em três tipos, sendo estes: os depósitos de canal, os depósitos de dique marginal e os depósitos de planície de inundação. Os tipos de depósitos podem ser subdivididos em depósitos de canal, geralmente formado por sedimentos mais grosseiros (arenosos) formados junto aos canais dos rios; de dique marginal, também compostos comumente por material arenoso, comumente associados a estruturas como barras de meandro ou meandro abandonado; e de planície de inundação constituídos de maneira genérica por sedimentos finos (areia e silte) por meio de processos de decantação em períodos de enchente de cursos fluviais (Mendes, 1992).

Estas constatações realizadas por Wildner *et al.*, (2008) se confirmam ao observar o perfil dos poços de monitoramento instalados pela empresa que gerencia o depósito em questão e o perfil dos poços de monitoramento instalados por Binotto (1997). Nestes é possível observar que todo o substrato local formada majoritariamente por sedimentos inconsolidados. Estes sedimentos estão provavelmente dispostos em camadas formando um arranjo complexo das mesmas.

Contudo, segundo mapeamento de Wildner *et al.*, (2008), tal área estaria disposta sobre a unidade de depósitos de barreira pleistocênica 3, da Planície Costeira do RS, que especificamente nesta área estaria correlacionado a um ambiente de deposição lagunar e que segundo o autor seriam formados majoritariamente por “areia siltico-argilosa, mal selecionada, com laminação plano-paralela incipiente, concreções carbonáticas e ferromanganesíferas” (Figura 3).

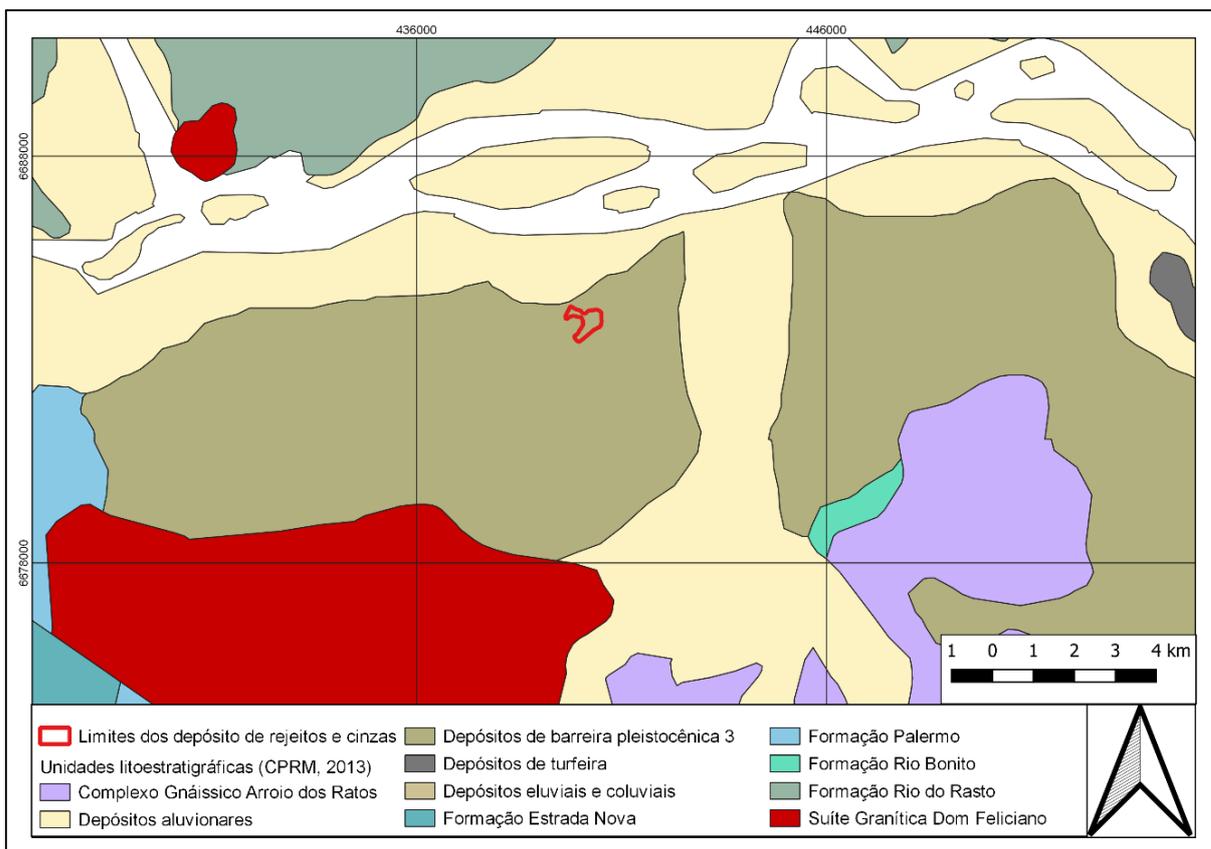


Figura 3. Unidades litoestratigráficas que ocorrem na região da área de estudo (Wildner *et al.*, 2008).

2.2 CLIMA REGIONAL

A classificação climática global de Köppen-Geiger foi desenvolvida no ano de 1900 por Wladimir Köppen e posteriormente aperfeiçoada por Rudolf Geiger entre as décadas de 1910 e 1930. De forma objetiva esta classificação se baseia em temperaturas observadas ao longo do ano e nos volumes de precipitação em cada período do ano, em especial da estação do ano, para assim classificar o clima de uma determinada região. (Alvares *et al.*, 2013). Segundo o mapeamento de Beck *et al.*, (2018), foi observado que ocorre um tipo de clima no Estado do Rio Grande do Sul, utilizando a classificação de Köppen-Geiger, sendo ele, o clima subtropical úmido nas suas variantes Cfa (subtropical, com verão quente) e Cwa (subtropical de inverno seco e verão quente).

O clima na região carbonífera do presente estudo é do tipo subtropical úmido (Cfa), que segundo a classificação de Köppen-Geiger é marcado por: ocorrência de temperatura de -3°C a 18°C nos meses mais frios, com verão e inverno bem definidos e nas temperatura dos meses mais quentes, acima de 22°C . Além disso, no que se

refere à precipitação, este tipo de clima costuma apresentar chuvas em todos os meses do ano, sem uma estação seca pontualmente definida. (Alvares *et al.*, 2013).

2.3. CARVÃO NO RIO GRANDE DO SUL

O carvão brasileiro está presente na Bacia do Paraná, mais especificamente na Formação Rio Bonito pertencente ao Grupo Guatá e datam do período Permiano. De acordo com o trabalho de Gomes *et al.* (1998), aproximadamente 88% do carvão mineral brasileiro encontra-se no Rio Grande do Sul cujos jazimentos mais importantes são de Sudoeste para Nordeste, Candiota, Capané, Iruí, Leão, Charqueadas, Morungava/Chico Lomã e Santa Terezinha. As camadas destes depósitos em geral possuem de zero a 1.200m de profundidade.

Em 2016, a produção de *run of mine* ou ROM (carvão bruto retirado diretamente da mina) do estado do Rio Grande do Sul foi de 4.840.599 toneladas. Estes valores representam aproximadamente 43% da produção dos três maiores estados produtores que são Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A maior parte do carvão mineral do estado é destinada para o uso no setor elétrico, contudo ele também é usado nos setores como o de alimentos, cerâmica, cimento, indústria, papel celulose, petroquímica, na própria mineração, dentre outros. (ABCM, 2016)

Uma característica marcante do carvão sul-riograndense é a alta quantidade de matéria inorgânica presente em sua estrutura, o que diminui seu potencial calorífico. A matéria inorgânica do carvão é medida fundamentalmente por teores de cinzas e sulfetos (em especial a pirita). Para as jazidas do estado, o carvão mineral possui teores de cinzas médio que variam aproximadamente de 45 a 60% e de enxofre entre 1 a 5%. Em geral sua classificação ASTM é de carvões betuminosos de alto volátil C a B, por vezes não coqueificável (Süffert, 1997).

Novamente, segundo Gomes *et al.* (1998), a gênese destas camadas de carvão está majoritariamente correlacionada a um ambiente deposicional de laguna-barreira cuja costa seria dominada por ondas sob ação secundária de marés, onde a matéria orgânica teria sido depositada na porção anterior à barreira. Dessa forma o autor aponta que os altos teores de sulfetos têm uma gênese relacionada à entrada de águas marinhas no ambiente. Outros ambientes deposicionais de menor relevância no que se refere à formação de jazidas, também são citados como gêneses de

algumas jazidas, como deposição em planícies deltáicas ou planícies aluviais e leques aluviais. Corrêa da Silva (1987) citado por Binotto et al. (1997) destacou que estas camadas teriam se formado a partir de turfeiras majoritariamente em ambiente subaquosos. Estas turfeiras possuiriam fácies orgânicas límnic e limnotelmática e seriam em sua maioria formadas por vegetação de pteridófitas com dimensões herbáceas com alguma influência de gimnospermas arborescentes. Contudo, Cazzulo-Klepzig et al. (2007) mostra que alguns destes ambientes possuíam um amplo domínio de gimnospermas e uma baixa representatividade de pteridófitas.

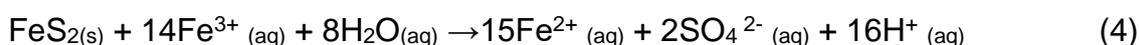
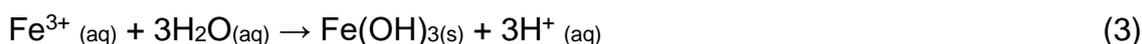
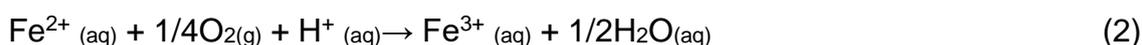
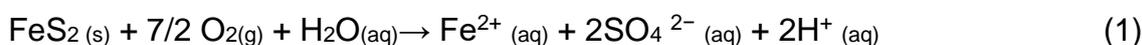
2.4. CONTAMINAÇÃO POR REJEITO DE CARVÃO E CINZAS DE CARVÃO

Um dos grandes problemas ambientais causados pela indústria da mineração é a geração de drenagem ácida de mina (DAM). Este processo ocorre a partir da oxidação de minerais sulfetados, em especial a pirita (FeS_2), que é muito comum em diversas associações de minérios e no carvão. Durante os processos intempéricos ocorre a dissolução de cátions nos minerais do solo e das rochas. De maneira geral, estes elementos em contato com soluções de pH neutro (entre 5 e 7), tendem a ser imóveis e dependendo das condições geoquímicas do ambiente, podem inclusive se precipitar como hidróxidos, sulfetos, silicatos, carbonatos e etc.

Contudo, à medida em que o grau de acidez da solução aumenta, tais elementos tendem a entrar cada vez mais em solução. Um dos principais problemas acarretados pelo fenômeno de DAM, além da própria acidez da água, é a mobilidade de metais que ocorre em função deste processo visto que em altas concentrações, cátions de elementos como Fe, Cu, As podem ser nocivos ao meio ambiente e à saúde humana. Tal fato torna-se ainda mais preocupante à medida que estas águas se infiltram no solo e na rocha e contaminam o aquífero com altas concentrações destes metais. Isso gera uma pluma de contaminação que, se não mitigada, pode alcançar grandes distâncias e gerar graves problemas ambientais. (Mello *et al.*, 2014)

Como já mencionado, o principal mineral gerador de drenagem ácida é a pirita. No carvão, este sulfeto é comumente encontrado em função das condições redutoras de formação deste bem mineral. De acordo com Singer & Stumm (1970) citado por Mello *et al.* (2014), geoquimicamente a formação de drenagem ácida a partir da pirita ocorre a partir de dois processos, sendo o primeiro mais comum em ambientes ácidos

com níveis de pH acima de 3 e outro em soluções com valores de pH entre 2 e 3. Em geral, são quatro as reações químicas principais destes dois processos, sendo elas:



Ainda, segundo os autores, a primeira reação tem início a partir da oxidação da pirita em meio aquoso liberando Fe^{2+} em solução concomitante a dois mols de (Equação 1). Posteriormente ocorre um segundo processo de oxidação dos cátions de Fe^{+2} que se tornam Fe^{+3} (Equação 2). Essa segunda reação é limitante do processo em função do tempo de meia vida do Fe^{+2} que gira em torno de 1.000 dias. Contudo, bactérias comuns em ambientes subaquosos podem acelerar esta reação, o que pode agravar o processo. Por fim, há um processo de hidrólise que precipita hidróxido de ferro e libera prótons na solução que rebaixam os níveis de pH. O segundo processo se limita à última equação, quando o processo de hidrólise da equação 3 é irrisória. Neste contexto, a pirita tende a ser oxidada em razão das altas concentrações de Fe^{+3} presentes na solução.

De maneira genérica, em depósitos de rejeitos de carvão e de cinzas, estes processos tendem a se acentuar em razão de sulfetos como a pirita serem um rejeito desta mineralização e não o próprio minério como em outras jazidas de minérios. Desta forma, é natural que antigos rejeitos de mineração de carvão possuam altos teores de enxofre, ferro e arsênio que possam causar sérios riscos ambientais, se não gerenciados corretamente.

2.5 ESTUDOS SOBRE A CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CAPÃO DA ROÇA

Um dos principais trabalhos no que se refere à contaminação por rejeito de carvão e cinzas na região de Charqueadas e São Jerônimo foi a dissertação de Mestrado da geóloga Raquel Binotto, em 1997, sob o título de “ Avaliação do Grau de Contaminação das Águas Subterrâneas em Áreas de Influência de Resíduos do Processamento do Carvão” (Binotto, 1997). Este trabalho contemplava a avaliação da contaminação de diversos depósitos de rejeito de carvão e/ou cinzas de carvão na região de São Jerônimo e Charqueadas, sendo que dentre tais depósitos, um dos principais e mais profundamente abordados foi o depósito disposto imediatamente a sul da então unidade de conservação do Capão da Roça, objeto do presente estudo. Desta maneira, o presente item e seus respectivos subitens abordam alguns dos resultados obtidos pela autora que serviram como dados secundários para o presente estudo.

Para a realização do trabalho em questão, a autora realizou, dentre outras atividades, a caracterização dos rejeitos de carvão e cinzas e a interpretação de resultados de análises físico-químicas de águas subterrâneas, junto a poços de monitoramento instalados por ela denominados P1 a P20 sendo os poços P1 a P8 aplicados no contexto do depósito de rejeitos do Capão da Roça. Além disso, a autora aplicou, junto ao depósito localizado na região de Capão da Roça, o método geofísico EM-34-3 para uma avaliação indireta dos contaminantes e para a locação dos poços de monitoramento a serem analisados.

2.5.1 Caracterização dos rejeitos do depósito do Capão da Roça

A caracterização do material do depósito foi realizada em amostras superficiais (CH 20A, CH 20B, CH 20C e CH 20D) e em outras quatro amostras dispostas em maior profundidade (P1A2, P2A1, P2A2, P3A1 e P7 A1), estas últimas coletadas junto a instalação dos poços de monitoramento. A caracterização físico-química do material coletado foi feita analisando os seguintes parâmetros: cinzas, enxofre total, carbono total e pH inicial (Tabela 1).

Tabela 1. Resultados das determinações dos teores de cinzas, Stot, Ctot e pH inicial de Binotto (1997).

Amostra	Cinzas (%)	Stot (%)	Ctot* (%)	pH
CH20A	74,6	0,55	12,66	3,69
CH20B	74,5	0,66	13,79	3,77
CH20C	78	0,72	9,97	3,6
CH20D	77	0,49	11,59	4
P1A2	74,4	2,79	11,51	2,74
P2A1	74,32	1,42	13,09	2,70
P2A2	79,55	3,29	8,52	2,80
P3A1	74,08	3,63	11,6	2,60
P7A1	95,19	0,1	3,28	8,57

* Teor de matéria orgânica

De maneira geral, todas as amostras apresentaram um pH ácido – que conforme já comentado – se dá em função da presença de pirita junto ao carvão – com valores menores entre 3 e 4 nas amostras coletadas em menor profundidade e entre 2 e 3 nas coletadas em maior profundidade. A única exceção foi a amostra P7A1, localizada na porção onde só são observadas cinzas no depósito e que por sua vez dispõe de um pH básico de 8,57.

Além disso, as amostras de rejeito foram submetidas a testes de lixiviação, solubilização e extração total para os metais cádmio, cobalto, cobre, chumbo, níquel, manganês, cromo, ferro e zinco. Estes ensaios permitiram aos autores classificar a mobilidade dos metais em questão para cada amostra estudada.

De maneira geral, foi atribuída pela autora um potencial maior de poluição às amostras localizadas em maior profundidade em função de sua maior propensão à lixiviação e da maior concentração de elementos de fácil solubilidade. Os elementos mais móveis observados foram o manganês, o zinco, e o níquel. Os elementos de mobilidade intermediária foram o cádmio, o cobalto, o chumbo e o cobre e os menos móveis o ferro e o cromo. Ressalta-se, contudo, que o ferro, apesar de pouco móvel, ainda dispunha de um alto potencial poluidor em função dos seus altos teores.

2.5.2. Geofísica – Método eletromagnético EM34-3

Como método indireto para a avaliação da contaminação e para o auxílio na identificação dos melhores pontos para a instalação de poços de monitoramento, Binotto (1997) utilizou o método geofísico EM34-3.

De maneira genérica, o método em questão é baseado na indução de uma corrente elétrica em subsuperfície por uma bobina. A corrente em questão varia em subsuperfície de acordo com a condutividade do meio. O campo gerado pela corrente é medido por uma segunda bobina receptora e com base nos dados obtidos é possível determinar a condutividade elétrica do meio. Em geral, o espaçamento entre as bobinas é diretamente proporcional à profundidade de medição (Costa & Ferlin, 1994).

Desta maneira, Binotto realizou medições em um arranjo dipolo vertical em profundidades estimadas de 7,5 m, 15 m e 30m. Os resultados de seu trabalho apontaram a eventual existência de uma pluma de contaminação na porção sul do depósito. Essa pluma foi, posteriormente confirmada pela autora pelas análises físico-químicas e químicas nas amostras de água subterrânea. Esta pluma foi classificada como incipiente em função da anomalia, a ela associada, ocorrer apenas nas medições correlatas à profundidade de 7,5 m. Já dentro do depósito, a anomalia, associada à contaminação pela autora, era observada nas medições de profundidade 7,5 e 15 metros do depósito na sua porção NE.

2.5.3. Poços de monitoramento e mapa potenciométrico

Um dos produtos do trabalho de Binotto (1997) foi a instalação de poços de monitoramento junto à área de influência do depósito de rejeitos. Ao todo, foram instalados 8 poços de monitoramento, sendo dois a montante do depósito, três dentro do depósito e três a jusante do depósito. Os poços de Binotto (1997) eram denominados pela autora como P1 à P8 e serão tratados desta forma no presente estudo de forma a facilitar a distinção destes com os poços atuais.

Os poços P1, P2 e P3 estavam dispostos junto ao depósito de rejeito, enquanto o poço P7 estava disposto sobre a área de disposição de cinzas de carvão. O poço P6 foi considerado como ponto branco enquanto os pontos P5 e P8 estavam dispostos a jusante do depósito. O poço P4 estava localizado a jusante do depósito de rejeitos,

porém encontrava-se disposto sobre uma área dentro dos limites da drenagem, conforme pode ser observado na Figura 4 disposto a jusante do depósito de rejeitos. A disposição dos poços em questão pode ser observada junto Figura 4 e os perfis construtivos dos poços P1 a P8 são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7.

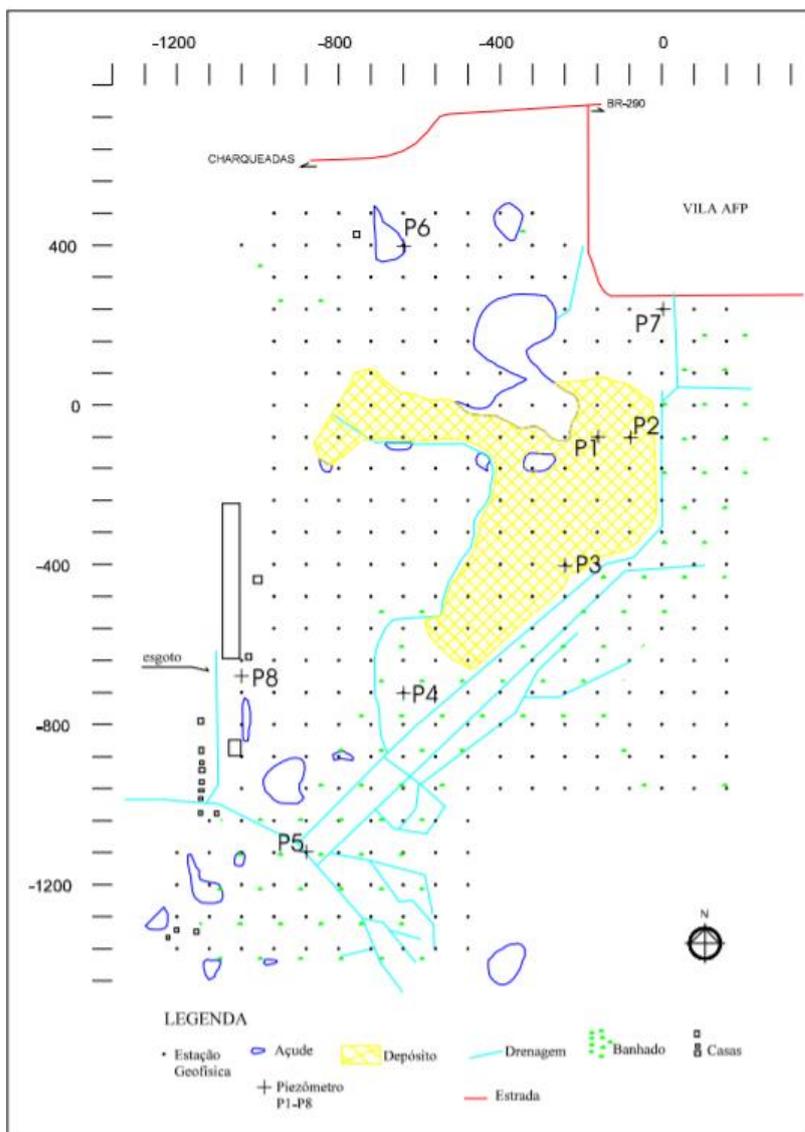


Figura 4. Disposição dos poços de monitoramento existentes no ano de 1997 (Binotto, 1997).

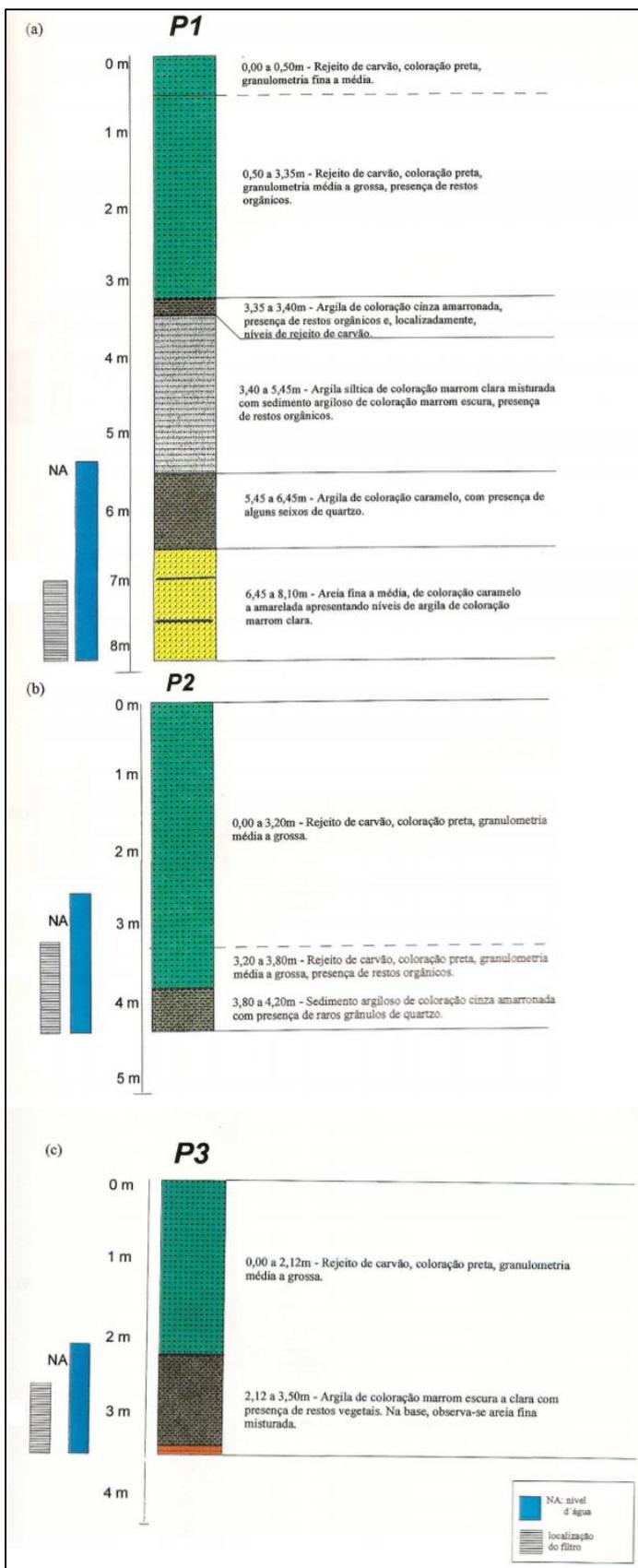


Figura 5. Perfis geológicos dos poços P1, P2 e P3, instalados por Binotto (1997), dentro do depósito de rejeitos.

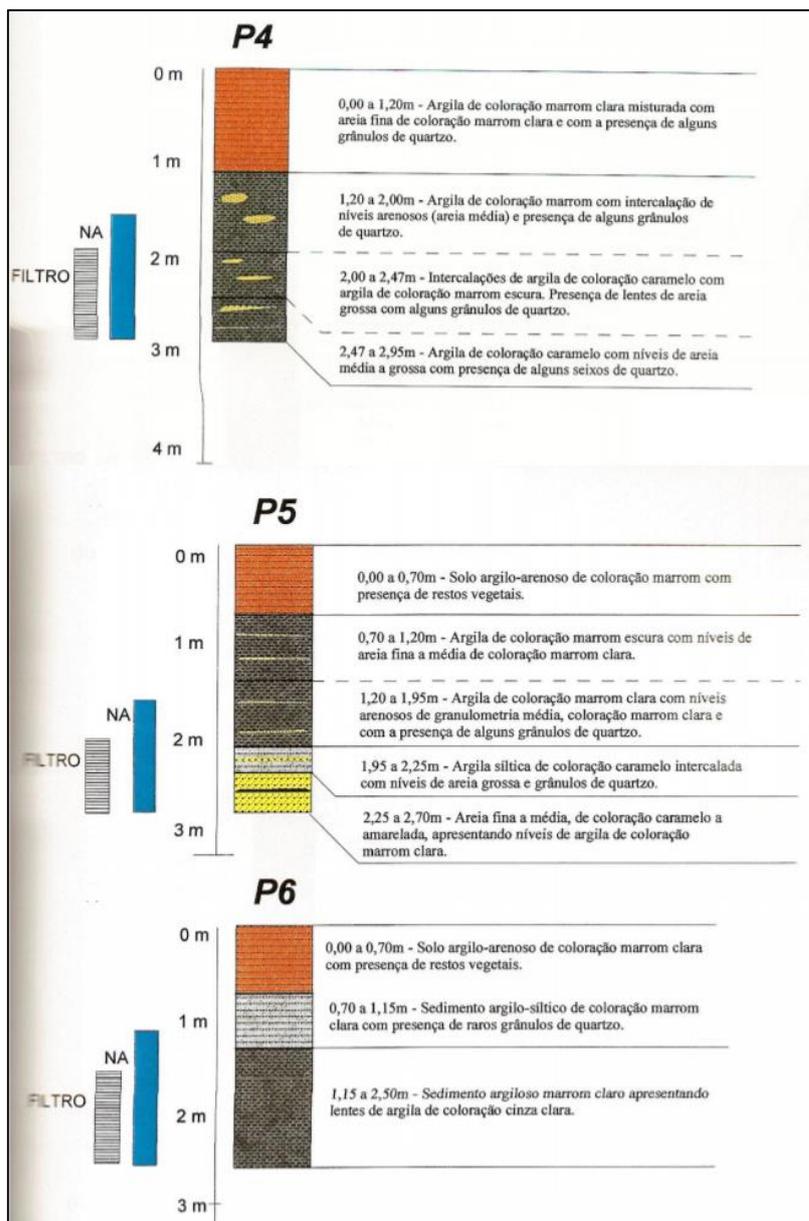


Figura 6. Perfis geológicos dos poços P4, P5 e P6, instalados por Binotto (1997).

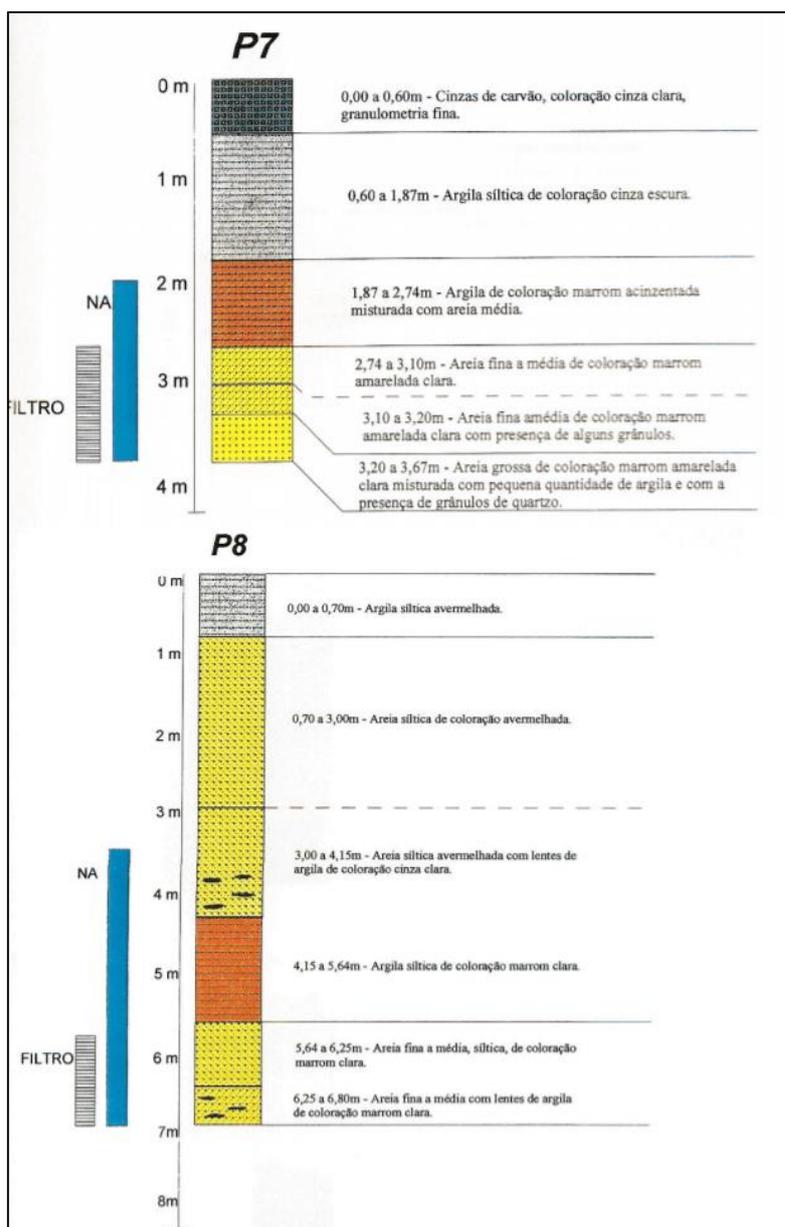


Figura 7. Perfis geológicos dos poços P7 e P8 instalados por Binotto (1997).

Além da realização de análises físico-químicas das águas subterrâneas, a instalação dos poços possibilitou à autora a elaboração de um mapa potenciométrico a partir medição do nível d'água junto aos mesmos. Tal mapa foi elaborado a partir da medição mensal de nível d'água entre os meses de abril e outubro. Ressalta-se que em função do poço P3 ter sido danificado pouco tempo após a instalação, o mesmo não foi objeto de medições mensais, sendo apenas objeto da medição a data da instalação do mesmo. O mapa em questão pode ser observado na Figura 8.

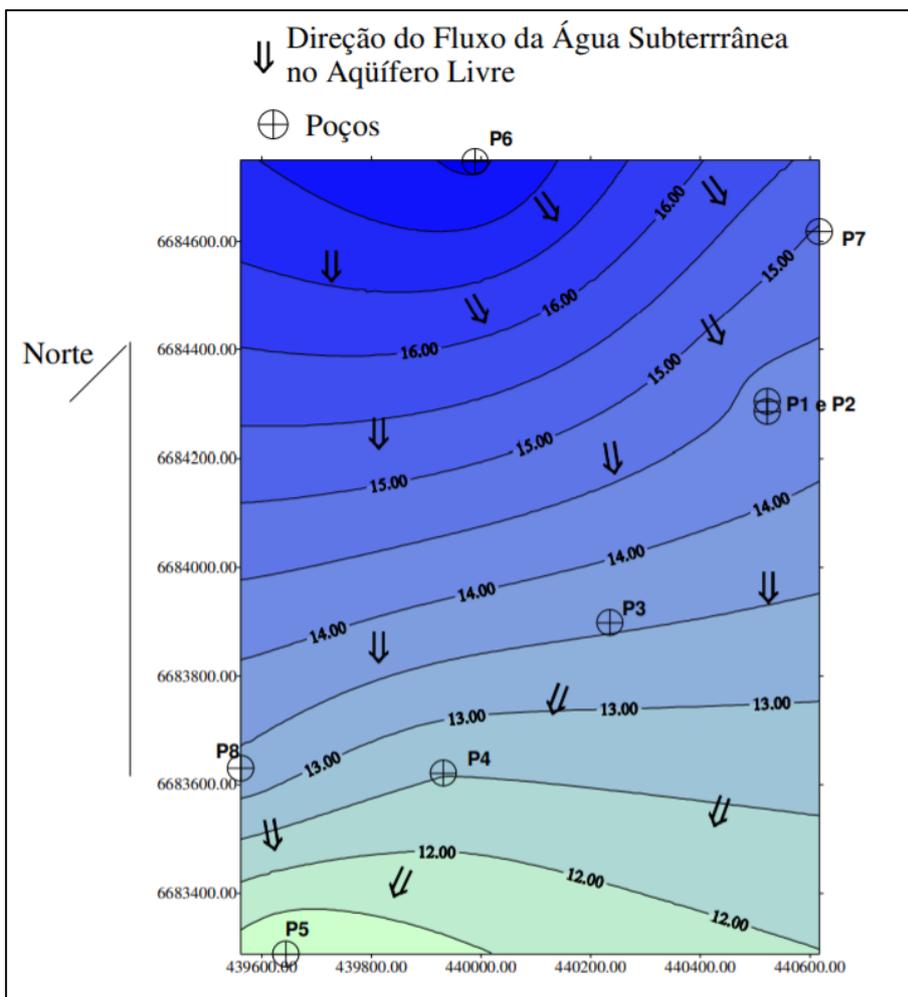


Figura 8. Mapa potenciométrico elaborado (Binotto, 1997)

2.5.4 Análises físico-químicas de águas subterrâneas

Foram realizados por Binotto (1997) análises físico-químicas de águas junto aos oito poços de monitoramento supracitados com intervalos mensais de tempo entre os meses de abril e outubro do ano de 1995. Os parâmetros analisados pela autora foram: nível de água, oxigênio dissolvido (OD), temperatura da água, Eh, condutividade, sólidos totais dissolvidos (TDS), pH, resíduo seco, sulfato, sulfeto, ferro bivalente, ferro total, acidez total, Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Mn, Cr, Fe, Zn, Mo, Al, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺.

Além disso, de posse das referidas análises, a autora realizou a determinação do Índice Geral para Água Subterrânea - I.G.A.S. bem como realizou a comparação dos resultados com os padrões de potabilidade da Organização Mundial da Saúde

(OMS). Como na época ainda não havia sido lançada a Conama nº396/2008, esta não foi objeto de comparação pela autora.

Ressalta-se que, conforme comentado no item 2.4.3, o P7 não representa a área do depósito de rejeitos mas recebe influência das cinzas.

Segundo os resultados de Binotto (1997), de maneira geral, as amostras coletadas junto aos poços de monitoramento, sejam dentro ou fora do depósito, apresentaram-se comumente intermediárias com valores de pH entre 6 e 8 nos meses de abril e maio. Contudo estas águas apresentavam-se ácidas, com pH aproximadamente 5,5, nos meses seguintes, quando, em geral, o nível d'água subterrânea baixava.

A única exceção a esta regra foi o poço P2, que por sua vez sempre apresentava pH próximo de 4, que, segundo interpretação da autora, teria uma maior influência do lixiviado do rejeito em relação aos demais. Outro poço que também, novamente segundo interpretação da autora, apresentaria forte influência do rejeito seria o P4 (imediatamente a jusante do poço de monitoramento, que apesar do seu pH próximo do intermediário, apresentava altos valores de SO_4^{2-} , sólidos totais dissolvidos, condutividade e Eh, assim como o poço P2. Isso levou a autora a constatar a influência da pirita junto às águas.

Outra constatação do trabalho da autora foi quanto ao enxofre, que se encontrava junto às águas subterrâneas na forma de sulfato, em função das baixas quantidades de sulfetos observadas nas análises.

No que tange os metais analisados, estes, geralmente, encontravam-se em altas concentrações em especial nos poços dentro do depósito (P1 e P2) com destaque para a alta variação de valores de Mn, correlatos a alta mobilidade do mesmo. Os elementos Pb, Ni, Zn, Cu e Al demonstraram teores altos apenas nos períodos de estiagem.

2.6 ESTUDOS DE ELETORRESISTIVIDADE NO CAPÃO DA ROÇA

O último trabalho mais aprofundado na localidade do Capão da Roça foi um trabalho técnico realizado pela empresa Intergeo, de Stevanato & Spinelli (2008) que buscava delimitar o depósito de rejeitos que dá origem à pluma objeto do presente trabalho.

Neste estudo, realizado em 2008, foram produzidos quatro perfis de caminhamentos elétricos ao longo da região de estudo. Tais caminhamentos foram realizados sobre um arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 6 níveis e espaçamento de 20 metros entre os eletrodos AB e MN. Tais caminhamentos podem ser verificados na Figura 9 e suas especificações podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Informações referentes aos caminhamentos de Stevanato e Spinelli (2008).

Linhas de Caminhamentos	Comprimento (m)	Número de Níveis
L1	680	6 níveis
L2	1160	6 níveis
L3	700	6 níveis
L4	1220	6 níveis

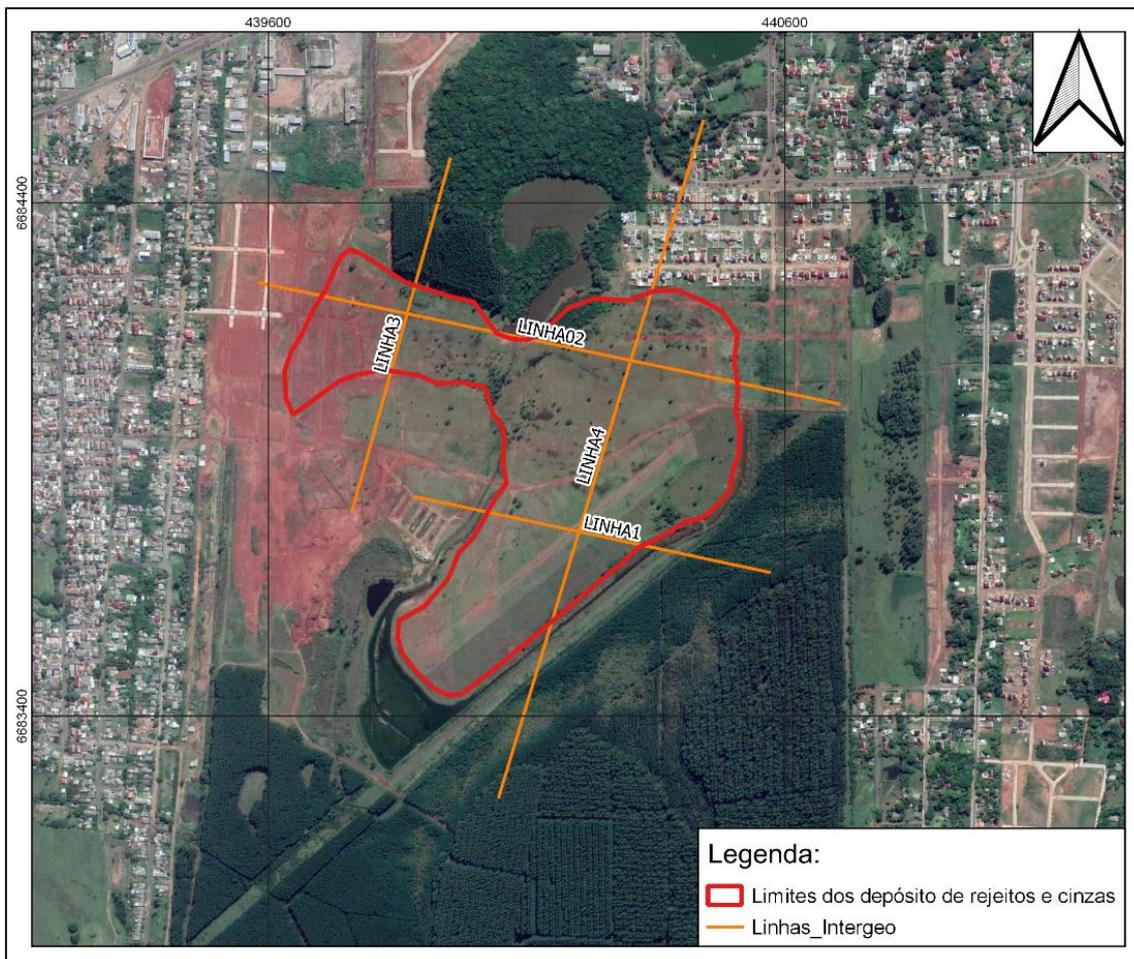


Figura 9. Caminhamentos realizados por Stevanato & Spinelli em 2008

No total foram realizados 3.760 metros de caminhamentos elétricos lineares. O equipamento utilizado pela empresa para a obtenção dos dados brutos de campo é conjugado de dois módulos: o primeiro, o transmissor de correntes denominado VT250 da marca AC ABEM, que utiliza como fonte uma bateria e que se conecta aos eletrodos transmissores AB; e o segundo, um módulo receptor, denominado VR250 da mesma marca e que se conecta aos eletrodos MN. O processamento dos dados foi realizado junto ao *software* Oasis Montaj™ e Zonge 2-D Inversion for Interactiv™ IP da Geosoft/Interpex.

De maneira geral, o levantamento realizado pelos autores confirmou os limites do depósito de rejeito junto à sua área anteriormente estimada de disposição além de não apresentar, sob o ponto de vista do método indireto em questão, a migração de fluidos contaminados para fora do depósito. As pseudosseções resultantes dos caminhamentos elétricos correspondentes as Linhas 02 e 04, que serão utilizadas no

presente trabalho, realizados pela empresa Intergeo pelos autores Stevanatto e Spinelli (2008), podem ser observadas nas Figura 10 e Figura 11. É importante destacar que a porção interpretada como condutiva em ambas as figuras, localizadas a partir das profundidades de 20 e 30 metros, de profundidade não estão associadas à contaminação e sim a prováveis mudanças na geologia das camadas.

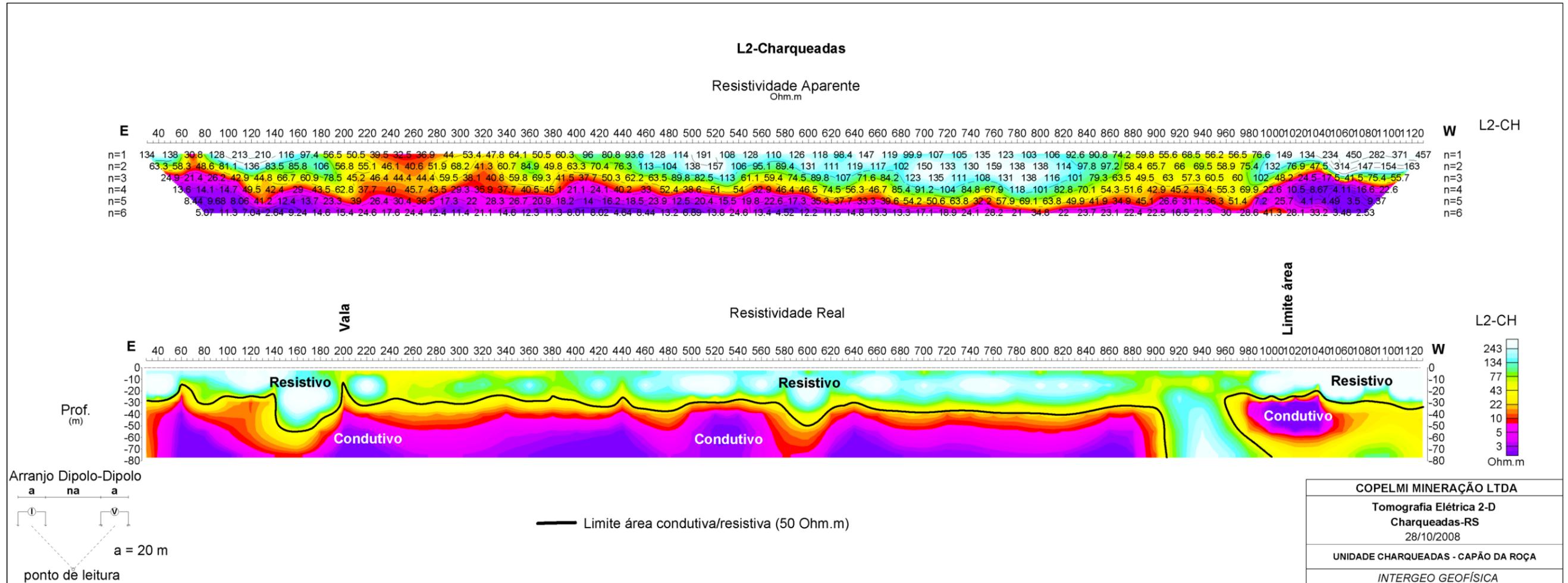


Figura 10. Pseudosseção resultante dos caminhamento elétrico denominado Linha 02 realizados pela empresa Intergeo (Stevanatto e Spinelli, 2008)

2.7 CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO ATUAL DO DEPÓSITO DE REJEITOS E CINZA DE CARVÃO

De acordo com Copelmi (1994), o depósito em questão é o maior depósito de rejeitos e/ou de cinzas de mineração de carvão da região e está assentado sobre uma área caracterizada por um lençol freático próximo à superfície e com uma geologia majoritariamente composta por intercalação de sedimentos arenosos a conglomeráticos e argilo-siltosos de origem aluvial. Em sua maioria, o depósito é formado por rejeito de minério de carvão tendo somente as porções norte e nordeste majoritariamente compostas por cinzas de carvão (Binotto, 1997).

De maneira geral, os procedimentos utilizados para a disposição dos resíduos não são completamente conhecidos. O depósito em questão passou, em meados dos anos 2000, por um processo de remediação que contou com a disposição de cinzas de termoelétrica sobre a camada de carvão seguido de solo de recobrimento com imediata revegetação por gramíneas. As cinzas adicionadas têm como principal função a diminuição da acidez e aumento do pH uma vez que tal material dispõe de propriedades alcalinas.

Além disso, o depósito dispõe de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) que funciona a partir da adição de cal para a correção do pH e imobilização dos metais dissolvidos. As porções leste, sudeste, oeste e sul do depósito encontram-se limitadas por canaletas que direcionam o efluente bruto para o tratamento na estação.

Geograficamente, o norte do depósito de resíduos encontra-se limitado por um lago e uma área de vegetação nativa, denominada Capão da Roça que por sua vez dá nome a localidade. Próxima à área com vegetação nativa também há a nordeste a ocorrência de uma área urbanizada. A oeste, próximo a ETE, há uma área residencial em construção. Já no que se refere à área sobre o depósito de rejeito, esta atualmente encontra-se coberta por pasto utilizado para a criação de cavalos e gado e vegetação de pinus dispostos de forma esparsa. Além disso dispõe de uma pista de pouso para aviões de pequeno porte. Ao sul há uma área revegetada com eucaliptos.

Atualmente, todos os poços de monitoramento instalados por Binotto (1997) encontram-se tamponados de forma que a área do aterro conta, hoje, com três poços de monitoramento (CR01, CR02 e CR03). No que se refere ao poço CR01 encontra-se disposto a montante do aterro (branco), enquanto o CR02 está posicionado

imediatamente a jusante do aterro e o CR03 encontra-se instalado dentro do aterro. Estes poços foram instalados junto ao aterro pela empresa Copelmi, gestora do depósito de resíduos em questão, e possuem 12 metros de profundidade e 4" de diâmetro sendo todos revestidos com tubos e filtros geomecânicos. Na Tabela 3., são apresentadas as coordenadas planas UTM, SIRGAS 2000, de cada um dos poços.

Tabela 3. Coordenadas dos poços de monitoramento atualmente existentes na localidade do Capão da Roça.

Poço de monitoramento	Coordenadas SIRGAS 2000 (UTM 22S)	
	Leste	Norte
CR01	440040	6684244
CR02	439807	6683308
CR03	440204	6683895

Os poços de monitoramento CR01, CR02 e CR03 foram construídos nos anos de 2002, 2003 e 2004, respectivamente e seus perfis geológicos apontam para um substrato local formado por sedimentos inconsolidados. Estes poços e a sua disposição em relação à posição dos poços de Binotto (1997), comentados no item 2.4.3, podem ser observados na Figura 12.

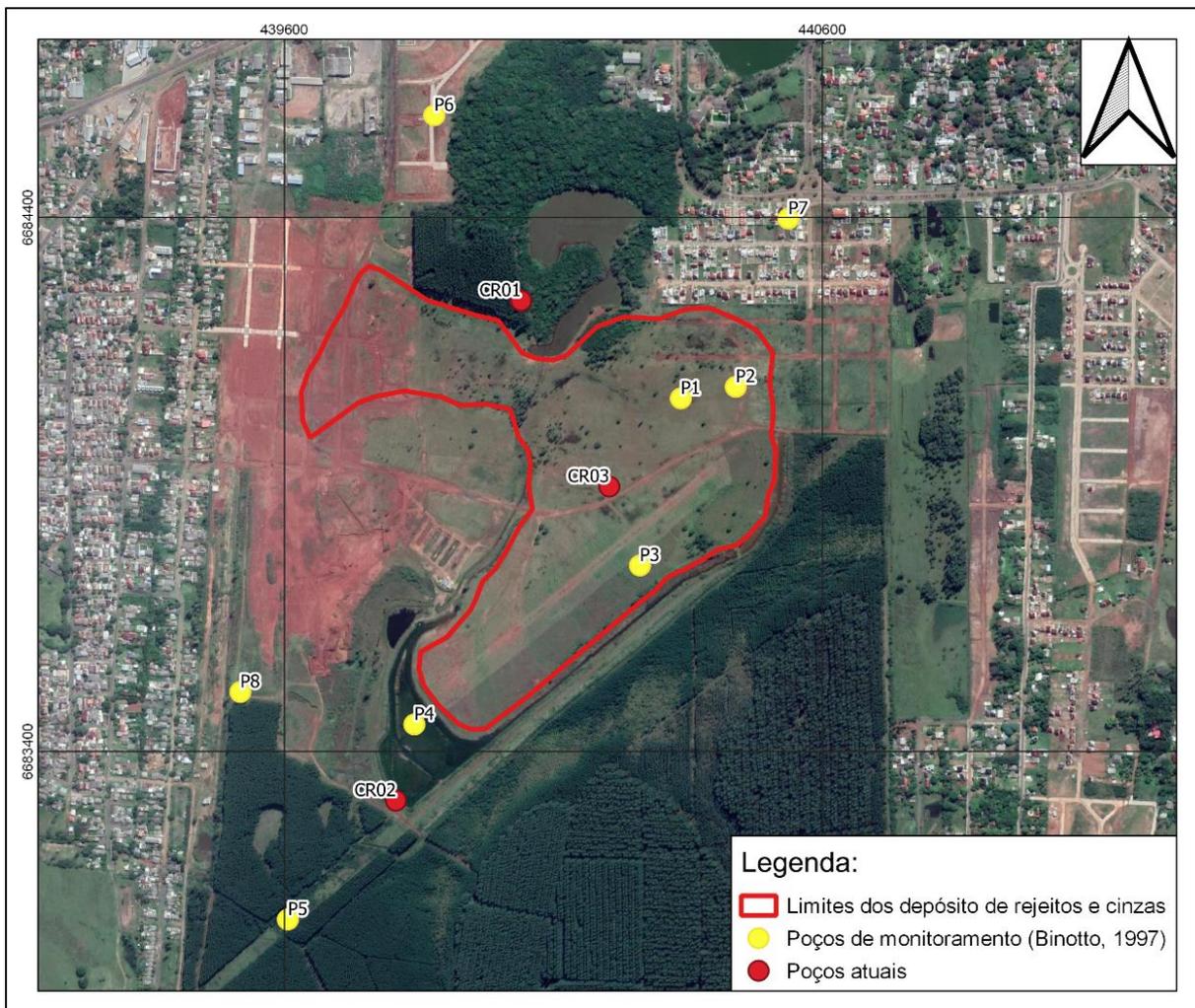


Figura 12. Mapa de localização dos poços de monitoramento que existem atualmente nas imediações do aterro e poços de monitoramento instalados por Binotto (1997), hoje tamponados.

O perfil litológico dos poços atuais CR01, CR02 e CR03 foram fornecidos pela empresa que faz a gestão dos mesmos e podem ser visualizados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15

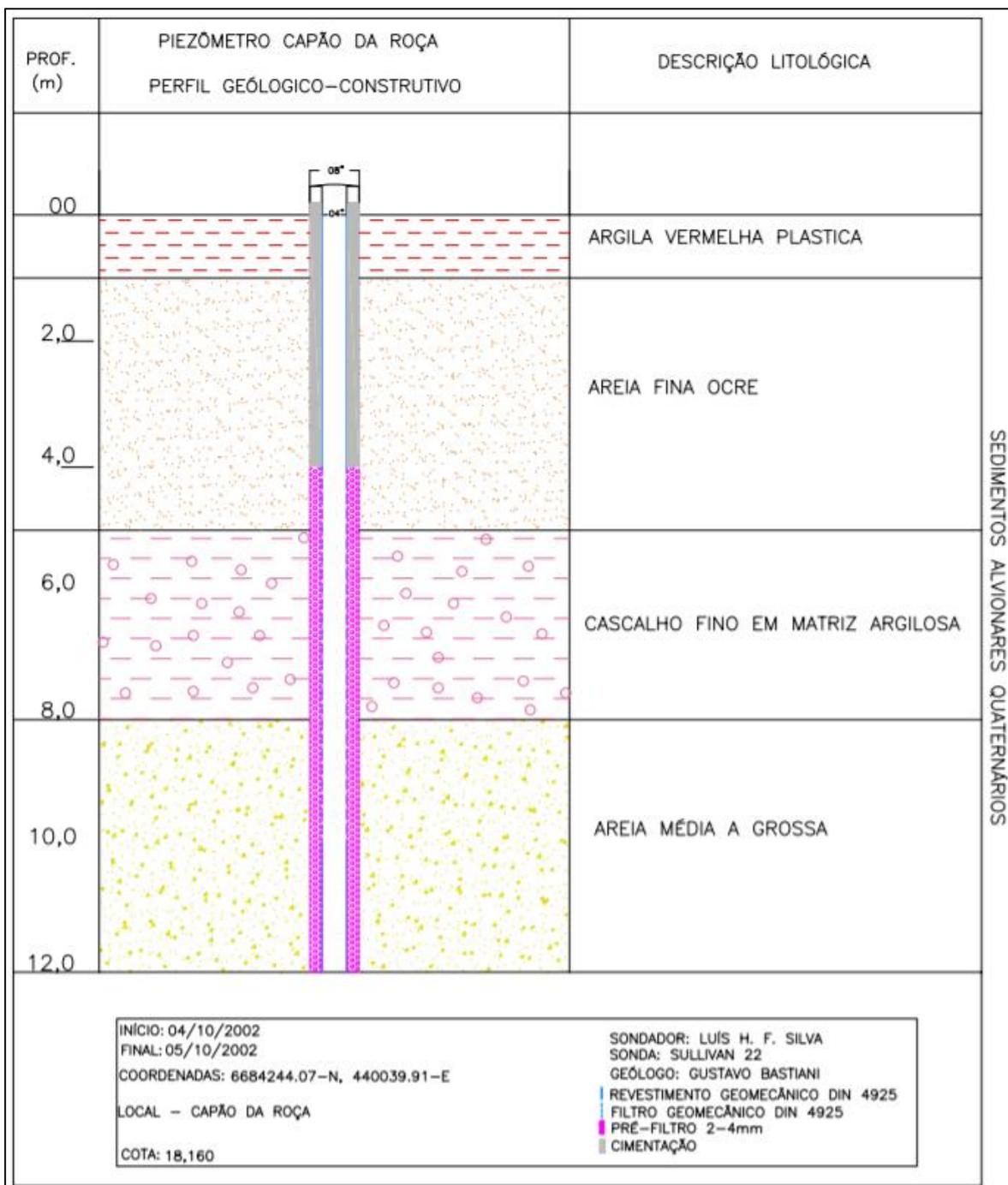


Figura 13. Perfil geológico e construtivo do poço de monitoramento CR01 (poço a montante do depósito de rejeito de carvão e cinzas) com nível d'água na cota 15,47 m de prof (Copelmi, 2020).

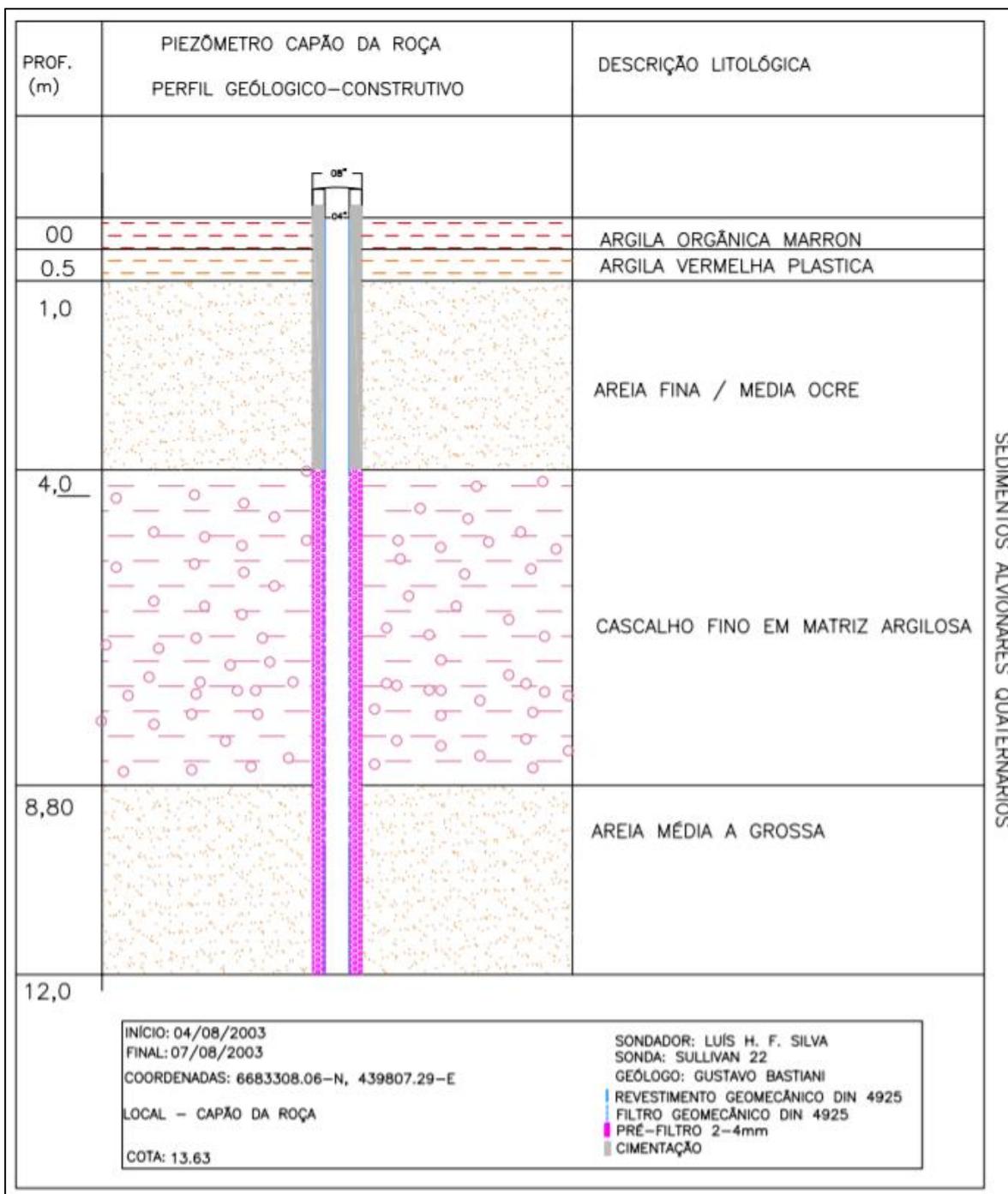


Figura 14. Perfil geológico e construtivo do poço de monitoramento CR02 (poço a jusante do depósito de rejeito de carvão e cinzas) com nível d'água na cota 11,27 m de prof (Copelmi, 2020)

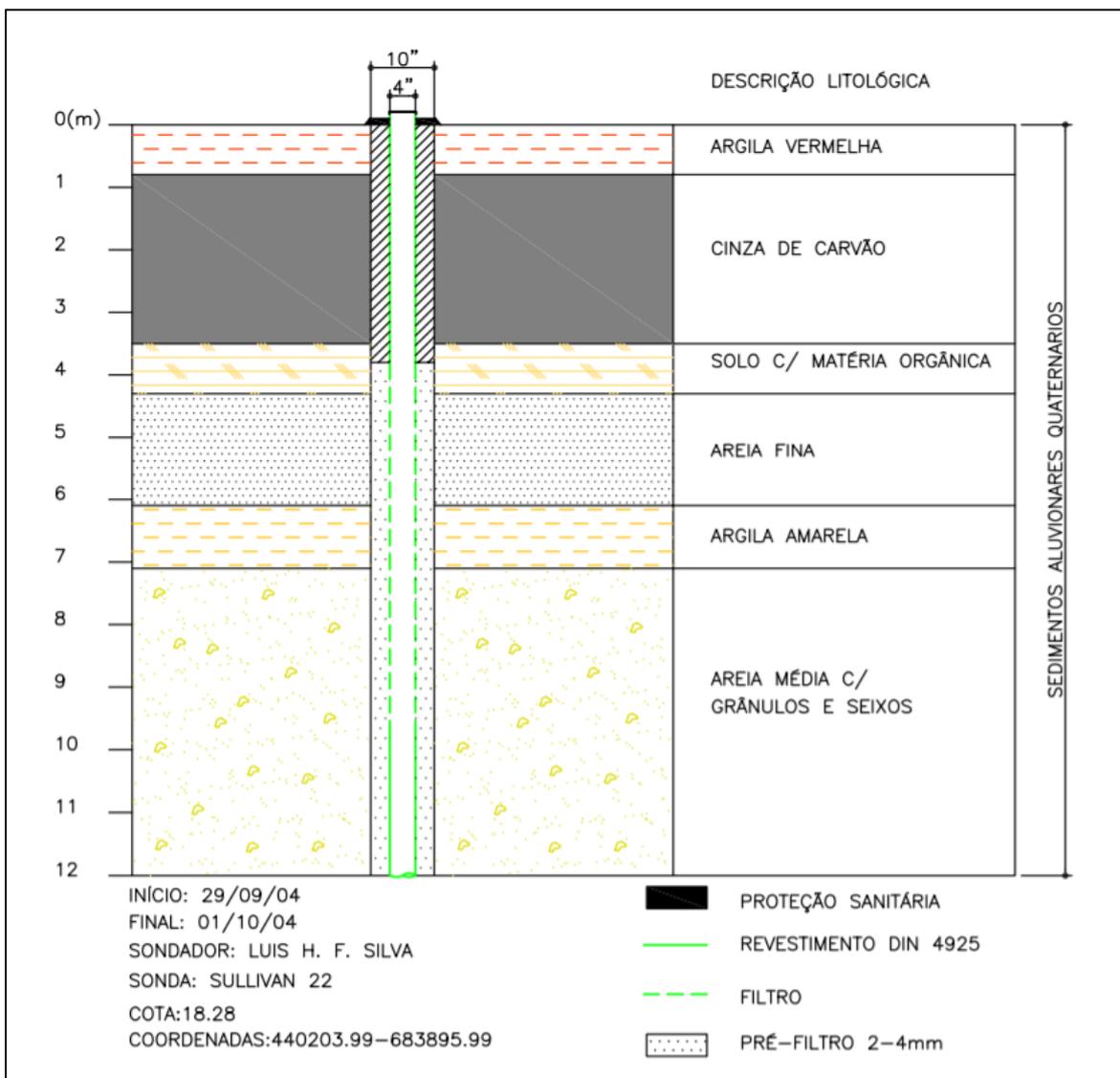


Figura 15. Perfil geológico e construtivo do poço de monitoramento CR03 (poço instalado dentro do depósito de rejeito de carvão e cinzas) com nível d'água na cota de 14,64 m de profundidade

Conforme pode ser observado nas Figuras 13, 14 e 15, a primeira dezena de metros que compõe o substrato no entorno do depósito de rejeitos é basicamente formada por sedimentos inconsolidados, provavelmente de origem aluvionar de idade quaternária. Ainda que se tenha à disposição os perfis construtivos dos poços de Binotto (1997) instalados junto ao depósito de rejeitos, a elaboração de uma seção geológica do depósito fica comprometida pois os poços de Binotto (1997) dispõem de uma profundidade menor em relação aos atuais (não fornecendo efetivamente um grande volume de dados sobre o substrato). Além disso, a própria geologia do substrato – formada por um arranjo de camadas (eventualmente lenticulares) de

sedimentos inconsolidados, sobrepondo-se umas com as outras – demanda um grande volume de dados para a elaboração de uma seção assertiva.

Desta maneira, pode-se utilizar como forma simplificada de descrição do substrato a caracterização de Copelmi (2020). Tal descrição considera que o substrato sobre o qual foram assentados os rejeitos de carvão e cinzas é basicamente formado pela intercalação de camadas arenosas e de finos sobrepostos a sedimentos conglomeráticos de grânulos e seixos com matriz que varia de argilosa à arenosa. Copelmi (2020) também relata que a posição do nível de água subterrânea em relação à superfície que no caso do depósito varia desde algumas dezenas de centímetros de profundidade até 5,5 metros de profundidade. Especificamente, para os poços CR01, CR02 e CR03 o nível estático medido em junho de 2020 pelo autor ocorre respectivamente a 2,69 m, 2,36 m e a 3,64 m de profundidade. Desta maneira, destaca-se, a saturação do rejeito pelo lençol freático em épocas de elevação do NA na posição do poço CR03, uma vez que a base do rejeito no entorno do poço encontra-se disposto a até aproximadamente 3,5 m de profundidade conforme a (Figura 15).

No que se refere aos efluentes, os mesmos são analisados mensalmente pela empresa que administra o depósito de rejeitos tanto em seu estado bruto (antes do tratamento junto à ETE) quanto em seu estado tratado (após o tratamento junto à ETE). Os locais de coleta do efluente tratado (CR07) e do efluente bruto (CR12) podem ser observados na Figura 16.



Figura 16. Pontos de coleta de efluentes gerados pelo depósito de rejeitos.

3 METODOLOGIA

3.1 ETAPA PRÉ-CAMPO

A etapa pré-campo consisti-se de levantamento bibliográfico sobre trabalhos já realizados na região, em especial os já comentados de Binotto (1997) (item 2.4) e Stevanato & Spinelli (2008) (item 2.5), dois dos principais trabalhos técnicos que abordaram o depósito em questão. Além desses, foram coletados dados secundários junto à empresa responsável pelo depósito, que forneceu resultados de análises físico-químicas de águas subterrâneas realizados anteriormente.

Também foi objeto desta etapa, o planejamento da posição dos caminhamentos elétricos a serem realizados junto ao depósito. Isto foi, em geral, de grande importância para a elaboração dos caminhamentos em questão, já que os mesmos deveriam ser muito bem planejados em virtude da extensão do depósito e do tempo hábil para a aplicação do método.

3.1.1 Dados químicas e físico-químicas das águas subterrâneas e efluentes

Uma das principais ferramentas utilizadas para o presente trabalho foram os resultados de análises físicas, químicas e físico-químicas de águas subterrâneas e de efluentes do depósito de rejeitos fornecidos pela empresa Copelmi, gestora do depósito de resíduos.

As águas subterrâneas foram objeto de análises entre 2008 e 2018 em três poços, sendo: um a montante (CR01), outro a jusante (CR02) e outro dentro do depósito de rejeitos (CR03). Em geral, tais análises eram feitas em intervalos semestrais, comumente em junho e dezembro, à exceção dos anos de 2008, quando as análises foram realizadas nos meses de janeiro, julho e setembro, e 2009, feitas em setembro e dezembro para 2009.

Já os efluentes eram comumente medidos mensalmente, junto aos pontos de coleta CR07 (efluente tratado) e CR12 (efluente bruto). As análises físico-químicas, físicas e químicas dos efluentes foram obtidas junto a empresa que faz o monitoramento do depósito e foram realizadas entre 2008 e 2019 em periodicidade mensal, porém em alguns anos feita trimestralmente. Além disso, diversos hiatos ocorrem entre as análises como a de diversos parâmetros junto ao ponto CR12 durante o período de junho de 2016 a dezembro de 2017.

Ressalta-se, que, tanto para as águas subterrâneas quanto para os efluentes, comumente alguns dos parâmetros não foram medidos em certas campanhas e que por vezes o método utilizado para a determinação de um parâmetro variava em relação ao anterior o que, por sua vez, culminava na variação do limite de detecção e do limite de quantificação.

3.2 ETAPA DE CAMPO

A etapa contou basicamente com reconhecimento expedito do local de forma a avaliar se a área condizia com o descrito na literatura. Após o reconhecimento, o principal objetivo da etapa de campo foi a realização de caminhamentos elétricos que serão percorridos nos itens a seguir.

3.2.1 Eletroresistividade e caminhamentos elétricos

O presente tópico tem por intuito retomar alguns conceitos básicos quanto à resistividade e sua relação com os materiais presentes em subsuperfície.

Segundo Kearey et al. (2009), a resistividade de um material é a propriedade física análoga à condutividade deste e pode ser definida como a resistência em ohms que dado material oferece a uma determinada intensidade de carga elétrica em uma determinada largura e comprimento. Em geral, ela é medida em ohm-metro (ohm m) enquanto que, para a condutividade é usado a unidade medida em siemens (S) que equivale a ohm⁻¹ ($1 \text{ Sm}^{-1} = 1 \text{ ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$).

Materiais metálicos, em geral, são considerados bons condutores. Contudo a grande maioria dos minerais formadores de rocha são, de forma genérica, maus condutores ou materiais isolantes. Assim, a condutividade de uma eventual corrente elétrica que perfaz um caminho em subsuperfície fica fortemente condicionada à água presente nos poros das rochas e a quantidade de ions dissolvidos na mesma. Desta maneira, a presença de porosidade de um material em subsuperfície que possibilite o armazenamento de água torna-se uma das principais variáveis para a alternância da resistividade. Ainda assim, não é apenas a porosidade que influencia na resistividade de uma rocha, já que a presença de fraturas e fissuras que contenham água pode tornar significante até mesmo rochas com porosidade intergranular irrisória.

Outra variável importante no que se refere à resistividade observada em subsuperfície é a textura do material que compõe o subsolo. Isto pode ser visto na Figura 17 que mostra a provável resistividade para cada tipo de rocha. (Kearey et al., 2009).

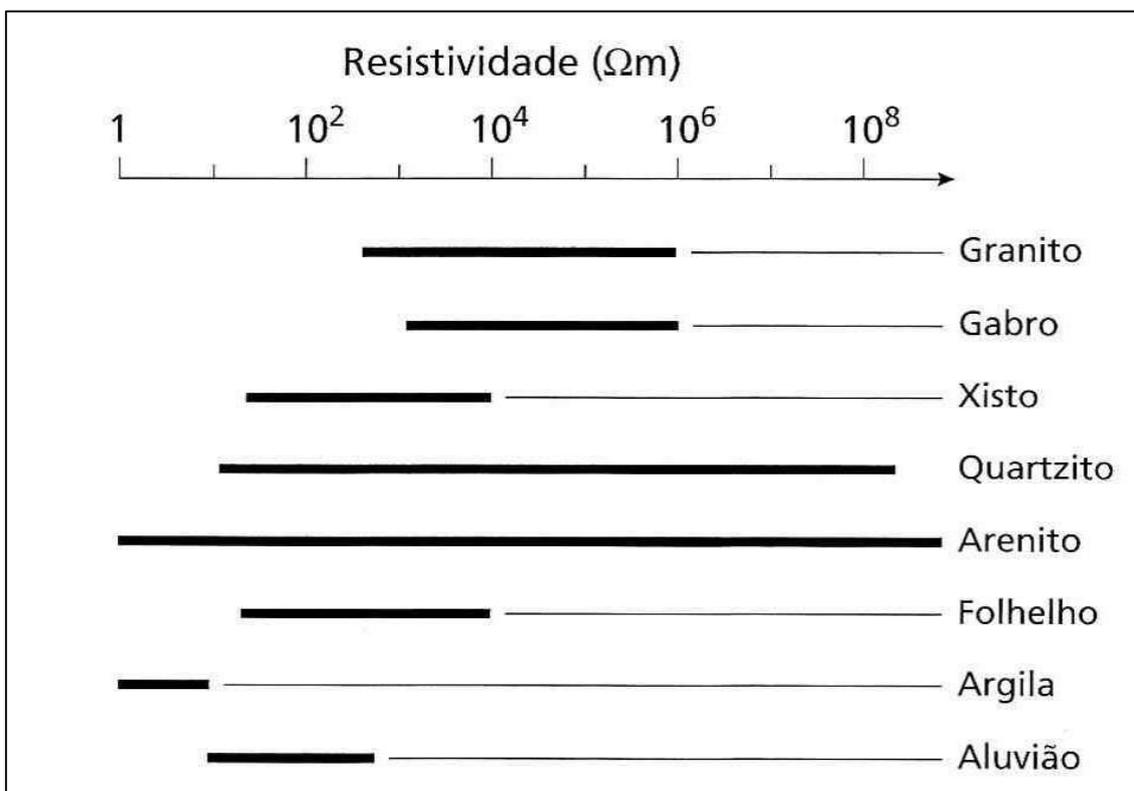


Figura 17. Intervalo estimado para valores de resistividade de determinados componentes em subsolo (Kearey et al., 2009)

De maneira geral, a condução de uma corrente elétrica em subsuperfície pode ocorrer ou por condutividade eletrônica ou por condutividade iônica. Enquanto a primeira está associada à presença de materiais condutores ou semi-condutores que permite a condução de corrente a partir dos elétrons na matriz da rocha e/ou sedimento, a condutividade iônica se dá a partir dos íons dissolvidos na água presente em subsuperfície (Braga, 2007).

Neste contexto, para um melhor entendimento das variáveis que condicionam a resistividade das rochas e sedimentos, Braga (2007) elencou os seguintes fatores como sendo os responsáveis pela variação da resistividade em subsuperfície: A resistividade das rochas e sedimentos presentes em subsuperfície; a resistividade dos líquidos presentes em subsuperfície; a textura e características geotécnicas dos

materiais; a quantidade de descontinuidades e/ou porosidade das rochas e sedimentos; a umidade da rocha e/ou dos sedimentos presentes em subsuperfície; e os processos que entre os líquidos e os minerais em subsuperfície.

3.2.1.1 Método de eletrorresistividade aplicado à contaminação

Não são poucos os trabalhos e pesquisas publicados que utilizam os métodos de resistividade para investigações hidrogeológicas, tais como, determinar contaminação ambiental em área de deposição de resíduos da mineração. Os usos dos métodos de eletrorresistividade são bastante frequentes na análise de impacto ambiental de resíduos na mineração. Isto porque, em geral, depósitos de resíduos e cinzas de carvão costumam possuir uma alta concentração de metais, tais como Fe, Zn, Cu, As, além de altos teores de sulfetos. Estes elementos tendem a ser lixiviados e a penetrar no aquífero, gerando uma pluma de contaminação. Desta forma, à medida que a água subterrânea migra, esta pluma tende a se espalhar pelo aquífero.

Em geral, quanto maior for o total de sólidos dissolvidos na água, maior será a permeabilidade desta corrente no meio aquoso. De maneira genérica, a relação entre resistividade e sólidos totais dissolvidos em um aquífero é de 0,6 ohm.m para 1 mg/L. Plumões de contaminação terão, em áreas mais contaminadas, uma maior concentração de sólidos dissolvidos e conseqüentemente menor resistividade e presumivelmente, à medida em que se afasta do centro desta pluma, menor será a concentração de íons e menor será a resistividade deste sítio (Telford et al., 1990).

É neste contexto que o método da eletrorresistividade, segundo Azambuja et al. (1999) pode “auxiliar consideravelmente na solução do problema, permitindo a delimitação rápida e contínua da distribuição lateral e em profundidade da pluma de contaminação”. Ainda assim, é importante salientar que tal método não é capaz de indicar qual o tipo de contaminante que há no aquífero, sendo apenas capaz de indicar sua localização, forma e intensidade, dada à heterogeneidade da resistividade da água subterrânea.

Também se salienta que é de grande importância, ter um elaborado conhecimento da geologia da área em que se aplica tal método. Isso ocorre, pois, como já foi dito neste trabalho, diversos são os fatores que influenciam na resistividade, sendo a litologia, um deles. Por exemplo, em uma área de aluvião onde

há predominância de fração areia e que possui, em meio a esta areia, uma lente de argila, obter-se-á, como resultado, uma área de alta resistividade. Assim sendo, em um estudo sem o conhecimento desta variação litológica, seria possível interpretar a resposta como uma área contaminada, o que seria uma conclusão equivocada e incorreta (Kearey *et al.*, 2009).

3.2.1.3 Caminhamentos Elétricos (CE) e aplicação junto à área de estudo

O método da eletrorresistividade consiste na indução de correntes elétricas geradas artificialmente por eletrodos conectados à superfície do terreno que percorrem um determinado trajeto em subsuperfície. Após percorrer tal trajeto, estas correntes são captadas e medidas por eletrodos receptores também cravados à superfície do terreno. Dessa forma, toda a alteração no padrão de diferenças de potencial que caracterizam um solo homogêneo tornam-se dados que permitem a caracterização da heterogeneidade do terreno (Kearey *et al.*, 2009).

Segundo Moura & Malagutti (2007), baseado em estudos de Keller & Frischknecht (1966), a aplicação deste método consiste essencialmente na transmissão de uma corrente elétrica gerada por dois eletrodos inseridos na superfície do terreno (A e B). Esta corrente perfaz um trajeto via subsolo até os outros dois eletrodos de receptores (M e N) que fazem a medição da diferença de potencial (ΔV) entre outros dois eletrodos. Assim, é possível calcular a resistividade aparente ($\rho\alpha$) a partir da equação:

$$\rho\alpha = K \frac{\Delta V}{I} (\Omega \cdot m)$$

sendo K , o fator geométrico do arranjo geral do quadripolo AMNB que varia com a medida do potencial e de acordo com a distância entre os eletrodos, sendo estas distâncias representadas por AM, AN, BM e BN na fórmula:

$$K = 2\pi \cdot \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right]^{-1} (m)$$

Este valor de ρ_a representa a média ponderada de todas as resistividades reais dos materiais por onde passou a corrente, sendo necessário o tratamento destes dados para a obtenção da resistividade real do ponto a ser analisado.

No que se refere à forma de aplicação do presente método, diversas são as técnicas e arranjos utilizados para a sua aplicação. Uma das técnicas mais utilizadas é a técnica do caminhamento elétrico (CE), pois é mais indicada para levantamentos com grande extensão lateral. As medições nesta técnica se dão a partir do afastamento dos eletrodos receptores em relação aos eletrodos indutores. Já o segundo, é realizado com o posicionamento dos eletrodos MN ao lado dos eletrodos AB. As medições para esta técnica se dão a partir do avanço dos eletrodos MN, sendo que cada avanço representa um nível mais profundo de investigação.

Após a finalização de todos os níveis, faz-se o avanço dos eletrodos AB para dar início a uma nova etapa de medições a partir do avanço dos eletrodos MN. Seguindo este procedimento, tem-se como resultado uma malha de pontos onde foram medidas as resistividades aparentes em subsuperfície (Figura 18, Figura 19).

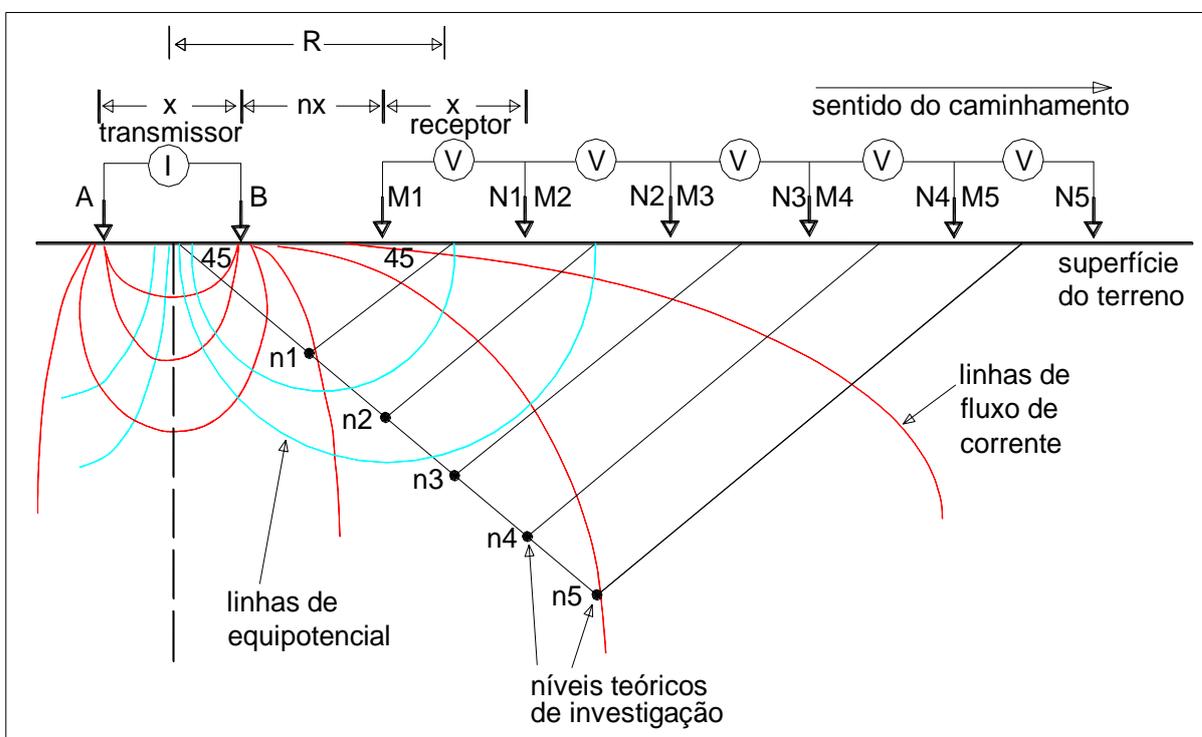


Figura 18. Procedimento do caminhamento elétrico em arranjo dipolo-dipolo indicando os eletrodos de corrente AB, de potencial MN, linhas de corrente, de potencial e níveis de investigação (Stevanato e Spinelli, 2008).

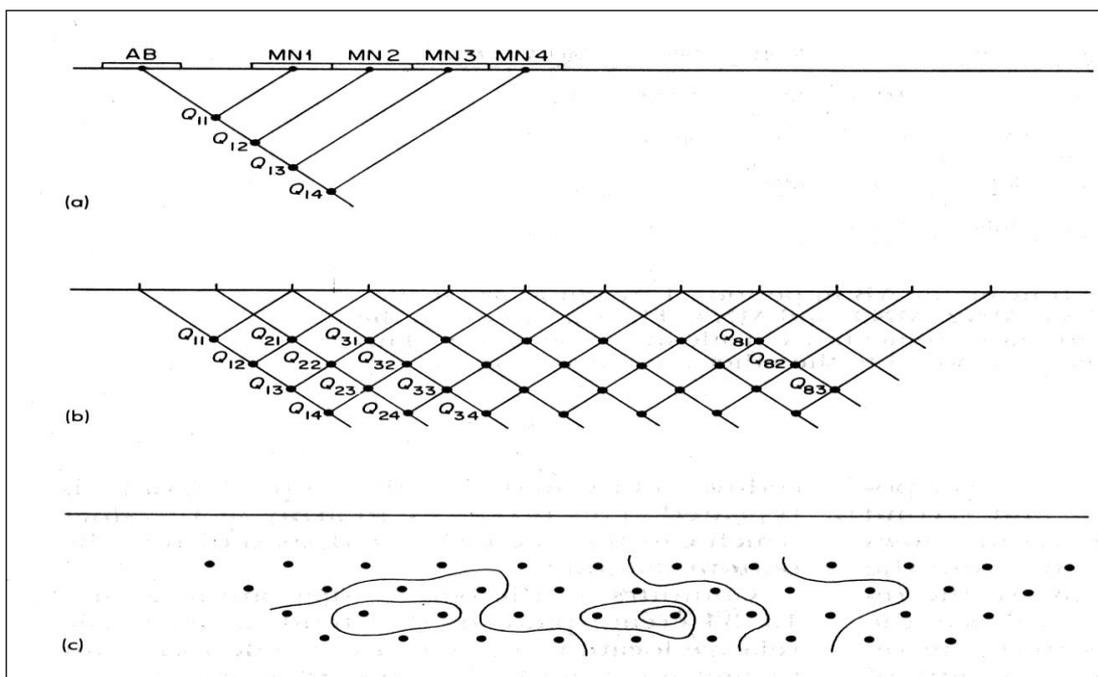


Figura 19. Representação de uma pseudoseção de medidas de um caminhamento elétrico (Stevanato e Spinelli, 2008).

Como já comentado, o último grande trabalho realizado na localidade do Capão da Roça foi produzido por Stevanato & Spinelli (2008). O trabalho apresentou extensos perfis de caminhamentos elétricos, o que facilitou o entendimento da pluma de contaminação. Neste contexto, optou-se pela realização dos caminhamentos elétricos no presente trabalho sobre as mesmas linhas dos caminhamentos realizados pelos autores supracitados. Isto possibilitaria também um melhor entendimento das alterações da pluma a partir das comparações entre os perfis.

Além disto, outro fator que influenciou na escolha das seções a serem feitas junto ao caminhamento foi a posição dos poços de Binotto (1997) e dos poços atuais cujos perfis litológicos já são conhecidos e conseqüentemente auxiliam na interpretação da resistividade observada.

O trabalho de Stevanato & Spinelli (2008), realizado através da empresa Intergeo, além de contar com grandes perfis, o que possibilitou a aquisição de um grande volume de dados, também conseguiu abranger uma grande área o que facilita o entendimento da disposição da contaminação. Neste contexto, optou-se pela realização dos caminhamentos elétricos do presente trabalho, utilizando aproximadamente as mesmas localizações de linhas e perfis dos caminhamento

realizados dos autores acima. Isto possibilitaria também um melhor entendimento das alterações da contaminação a partir das comparações entre os perfis.

Assim, foram realizados dois caminhamentos de forma transversais que correspondem a trajetos semelhantes aos caminhamentos correspondentes às linhas de caminhada 2 e 4 de Stevanato & Spinelli (2008).

Os caminhamentos foram realizados em: 17 de maio de 2019 para o caminhada elétrico 01; em 17 e 19 de dezembro de 2019, para o caminhada 02 (Figura 20). Ambos em foram realizados em condições climáticas favoráveis. As citadas datas decorreram em função da disponibilidade do equipamento pela CORSAN e também para que fosse avaliada uma eventual interferência sazonal junto ao substrato.

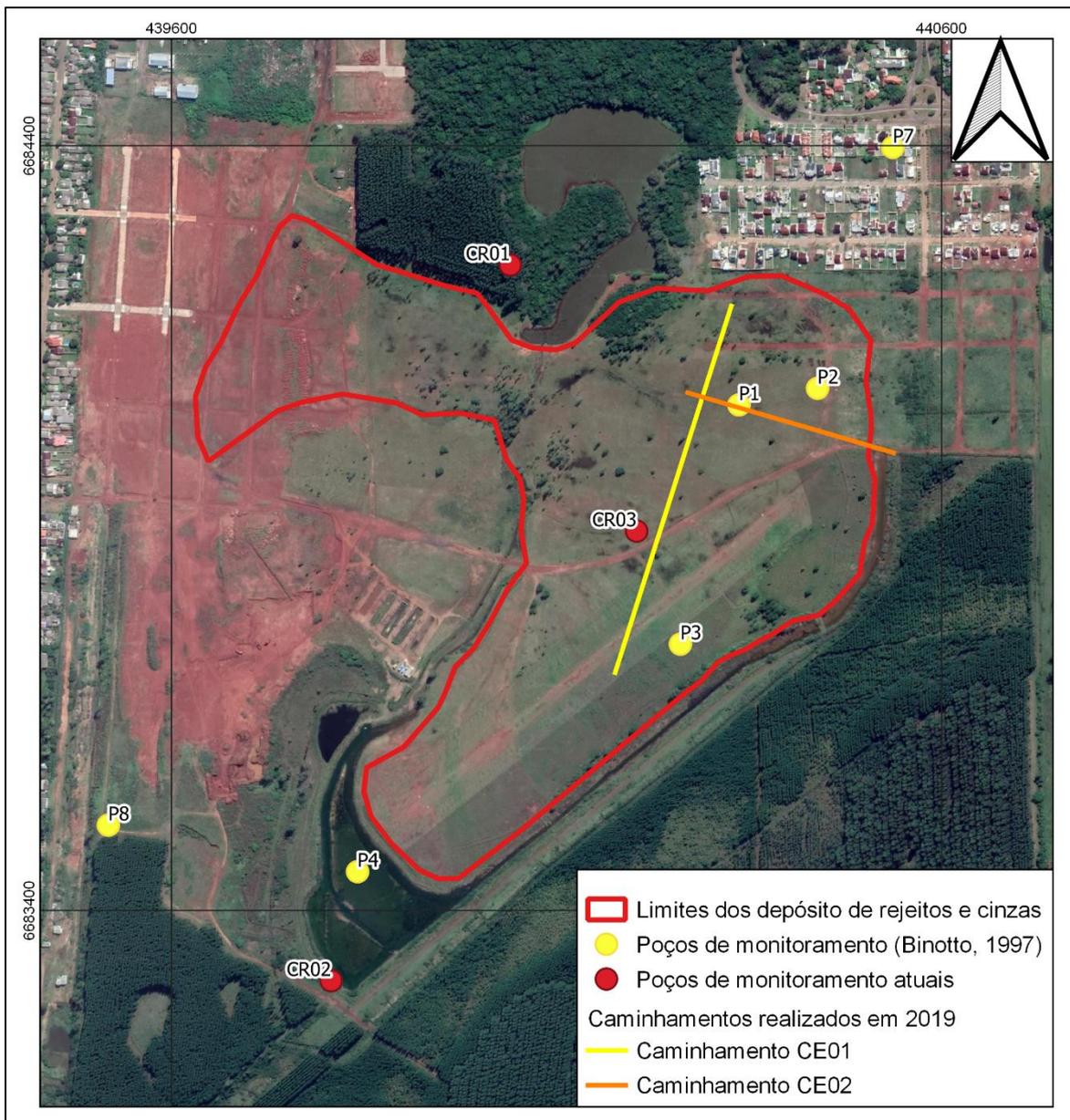


Figura 20. Posição dos caminhamentos realizados em 2019 em relação aos limites do depósito de rejeito e aos poços instalados por Binotto em 1997.

Ressalta-se, que não foram adicionados dados de topografia para avaliar a variação topográfica no local em função do caráter plano observado tanto em campo como em dados secundários. Conforme é possível observar nas Figura 21 e Figura 22, os perfis de elevação elaborados com o *software* Google Earth Pro, a maior variação ocorre no extremo leste do caminhamento CE01, com 4 metros, que pode ser facilmente interpretado avaliado de forma indireta. Além disso, outra fonte que confirma o caráter plano do local é um levantamento topográfico fornecido pela empresa Copelmi Ltda., gestora do depósito (Figura 23).



Figura 21. Perfil de elevação do caminhamento CE01 obtido junto ao software Google Earth Pro.



Figura 22. Perfil de elevação do caminhamento CE02 obtido junto ao software Google Earth Pro.

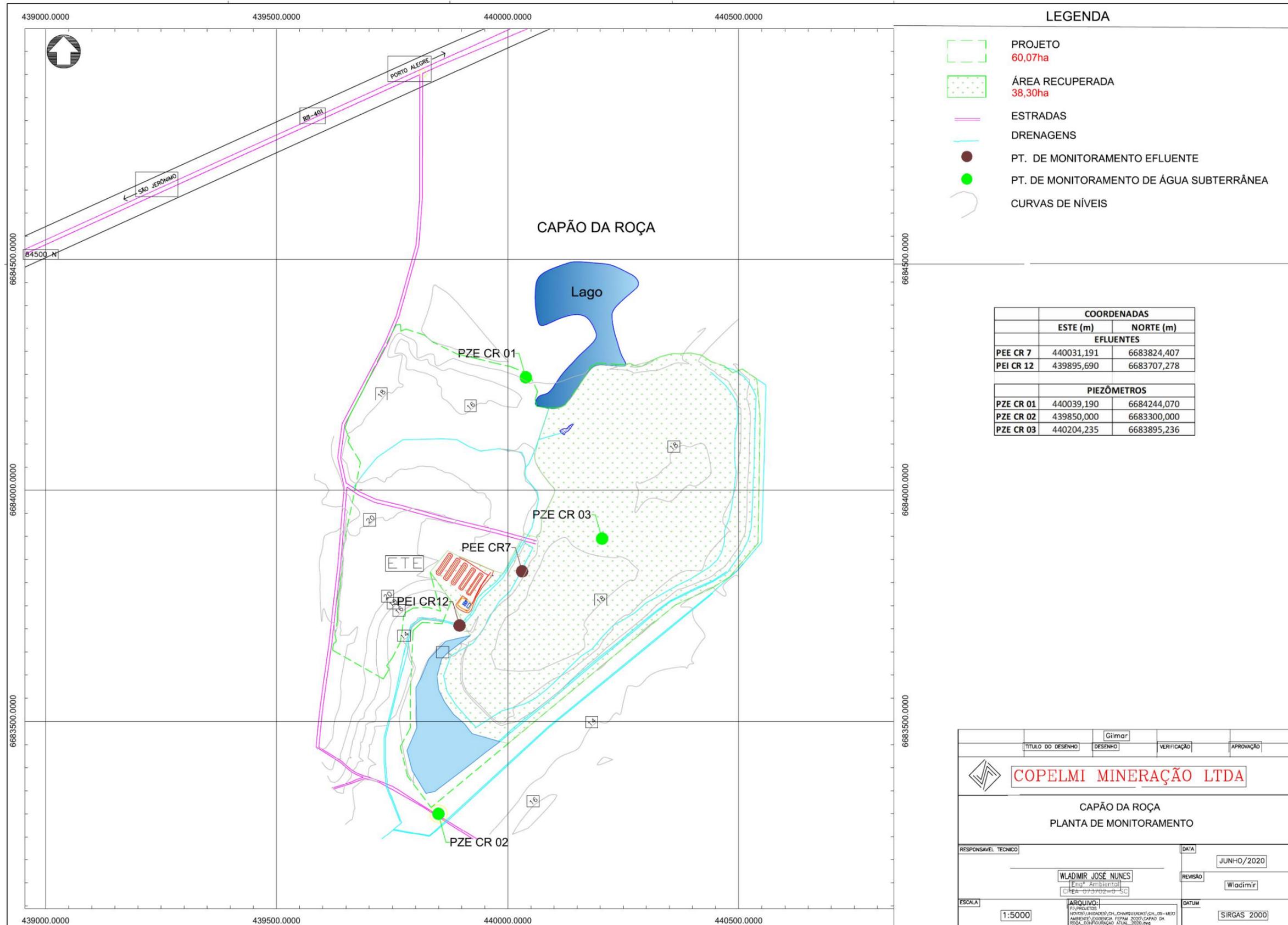


Figura 23. Planta topográfica em escala 1:5.000 disponibilizada por Copelmi Ltda.(Copelmi, 2020)

O aparelho utilizado foi o Resistivímetro SuperSting R1/IP, disponibilizado pela Corsan. O espaçamento de eletrodos AB e MN foi de 20 metros e foram utilizados 6 níveis de investigação (Figura 24 e Figura 25).



Figura 24. Resistivímetro SuperSting R1/IP, disponibilizado pela Corsan.



Figura 25. Anotação dos dados dos caminhamentos elétricos apresentados junto ao resistivímetro.

3.3 ETAPA PÓS-CAMPO

A etapa pós-campo contou basicamente com a compilação dos dados quantitativos por meio de softwares e com o levantamento de dados climatológicos, que são expressos nos subitens a seguir.

De maneira geral, a precipitação é um dos principais fatores climáticos que influenciam as águas subterrâneas afetando a qualidade das mesmas, já que a sua infiltração está associada, tanto à lixiviação dos contaminantes quanto à variação do nível freático. Neste sentido, para uma avaliação adequada da influência do clima da região na qualidade das águas dentro do depósito, buscou-se dados referentes à precipitação total mensal da região. Tais dados foram obtidos junto ao BDMEP do INMET. O BDMEP é um banco de dados meteorológicos em formato digital coletados pelas estações meteorológicas convencionais do INMET.

A estação meteorológica responsável pela aquisição dos dados utilizados no presente trabalho é a estação 83967 localizada em Porto Alegre. Esta foi escolhida por dois motivos: o primeiro por estar localizada em uma área com o mesmo tipo de clima segundo a classificação de Koppen-Geiger a partir do levantamento de Beck (2018) e o segundo por ser a estação mais próxima do depósito (aproximadamente 43 km a NWW da área de estudo).

Todos os dados aqui apresentados, sejam dos resultados das análises físico-químicas, dados climáticos do BDMEP ou de qualquer outro cunho, foram compilados a partir do uso do *software* Excel versão 2016, assim como os gráficos presentes neste trabalho.

Assim, foram compilados os dados climatológicos com os resultados das análises de água para desenvolvimento de um gráfico de precipitação em relação ao fator tempo. Este gráfico foi comparado com os parâmetros Fe, Mn, Al, STD, acidez, condutividade, sulfatos e pH para a avaliação de sua variação. Tais dados foram utilizados para melhor visualização da variação dos parâmetros em relação ao tempo, bem como para avaliar uma possível variação dos parâmetros com a precipitação do período.

Os dados das análises de água foram tabelados e comparados ao Conama nº 396/2008 que dispõe dos limites de parâmetros para cada uso de água.

Já os mapas existentes junto ao presente trabalho foram compilados com o *software* Quantum GIS versão 3.14

No que se refere aos dados de caminhamentos, estes foram compilados junto ao *software* RES2DINV ver. 3.53 for Windows 98/Me.

Conforme comentado no item 3.2.1.3, os dados obtidos junto ao caminhamento elétrico são na verdade dados da resistividade aparente medida para um ponto em subsuperfície, que considera toda a resistividade medida durante o percurso da corrente elétrica. Neste contexto, para a obtenção dos dados de resistividade real e consequentemente para a efetiva elaboração do imageamento da seção, foi necessária a utilização de um processo de inversão de dados (Gallas *et al.*, 2005). No caso específico do *software* Res2Dinv, os parâmetros utilizados são os valores de resistividade aparente medidos que são atribuídos a blocos do modelo (Figura 26).

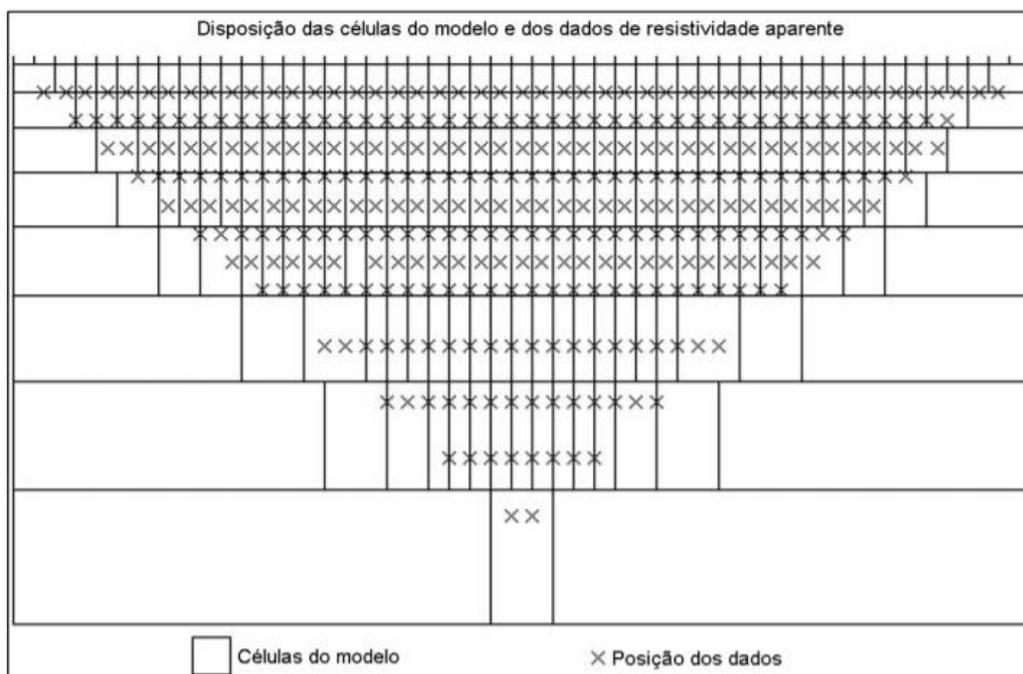


Figura 26. Modelo de células (ou blocos) utilizado pelo software Res2Dinv (Geotomo, 2007)

O programa em questão lança mão do método iterativo dos mínimos quadrados com vínculo de suavidade, expresso pela relação matemática:

$$(J'J + \mu F)d = J'g + \mu Fr$$

F = Matriz de suavização

J = Matriz Jacobiana

R = contendo o logaritmo dos valores de resistividade modelados

μ = fator de suavização

d = vetor de perturbação

g = vetor de discrepância

O erro médio quadrático, denominado RMS (*root-mean-squared*), é dado a partir da magnitude do vetor g que indica a diferença de resistividade aparente entre dois pontos (Geotomo, 2007).

Além do processamento com os dados obtidos junto aos seis níveis de observação, também foi realizada a compilação dos dados com apenas os dados dos três primeiros níveis de forma a obter um melhor contraste na porção onde os poços citados por Binotto (1997) e os do presente trabalho captam suas águas.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E QUÍMICAS DE ÁGUAS

Para a análise da contaminação do lençol freático foram utilizados os parâmetros Fe, Mn, Cr, Al, Cd, Ni (metais totais), sulfato, condutividade elétrica, temperatura, pH, sólidos totais dissolvidos (STD), acidez total (mg/L CaCO₃) e turbidez (UNT). Estes, conforme comentado nos itens 2.4.1 e 2.4.3, são comumente os parâmetros mais influentes no depósito em questão, seja pela sua disponibilidade junto ao rejeito, seja pela sua mobilidade junto ao meio (Binotto, 1997).

As análises de águas subterrâneas, objeto da interpretação no presente estudo, são as amostras coletadas dos poços CR01, CR02 e CR03 (associados aos pontos a montante, jusante e dentro do depósito respectivamente) no período de 2008 a 2018. O resultado dos parâmetros supracitados nas análises estão disponíveis nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 na página a seguir.

Além das análises físicas, químicas e físico-químicas das águas subterrâneas, também foram objeto de interpretação os resultados das análises de efluentes, haja vista a estrita relação entre os mesmos, já que estes são captados junto às canaletas que drenam o depósito de rejeitos. Para tal interpretação foram utilizados os mesmos parâmetros que foram utilizados para as análises das águas subterrâneas.

O monitoramento dos efluentes foi realizado de uma maneira mais constante que o das águas subterrâneas, tendo sido analisado mensalmente na maioria do período de monitoramento, ainda que em algumas ocasiões isto tenha ocorrido de forma trimestral. Há também alguns períodos de hiatos de análises, sendo o mais contundente associado ao CR12 no período de junho de 2016 a dezembro de 2017.

Por se tratar de tabelas com um volume muito maior de dados, optou-se, para o caso das tabelas de análises de efluentes dos pontos de coleta CR07 (efluente tratado) e CR12 (efluente bruto), pelo posicionamento das mesmas junto ao Anexo 1 – Análises de efluentes nas Tabela 17 e Tabela 18.

Tabela 4. Análises de água subterrânea do poço de monitoramento CR01 sendo os metais apresentados, medidos na forma de metais totais.

Data	Mn (mg/L)	Cr (mg/L)	Al (mg/L)	Cd (mg/L)	Ni (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Fe (mg/L)	Condutividade (mS/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez total (mg/L CaCO ₃)	Turbidez (UNT)
01/01/2008	0,019	ND	0,292	ND	ND		0,521			5,7	29		
18/07/2008	0,049	0,0021	0,501	ND	ND	9,3	6,28	41	18,2	5,1	26		
29/09/2008	0,063	ND	0,298	ND	ND	6,59	0,327	46,3	18,7	5,4	50		
29/09/2009			0,026			8,49		55,6	19,6	5,3	56	19,1	2,44
15/12/2009	0,052	0,002	0,063	< 0,001	< 0,01	< 1	0,62	128,9	21,6	5,9	36		
07/06/2010			0,273			< 1		36,8	19,2	6,1	20	34,4	3,69
27/12/2010	0,028	< 0,01	0,115	< 0,001	< 0,01	7,15	1,02	52,3	21,1	5,6	20	8,32	6,17
09/06/2011	0,026		0,115			1,6	0,9			5,32	33		1,5
08/12/2011	0,0317	< 0,0001	0,1182	< 0,0001	< 0,0001	< 5	6,26					120,4	417
15/06/2012	0,014		0,087			2,2	1,5	23	20	5,66	6	34,8	7
14/12/2012	0,0287	< 0,001	0,049	< 0,001	< 0,001	5	0,873	72	26	5,19	22	34,5	3,6
18/06/2013	0,014		1,015			28,9	1,108	29,9	20,8	4,86	18	20,93	12,84
16/12/2013	0,025		0,985			2	0,982	45,8	25,2	4,98	35	21,3	3,56
02/06/2014	0,0204		0,116			< 5	0,696	38	19,4	6,27	45	67,5	4,1
05/12/2014	0,0223		0,0462			7,1	1,2	56,7	24,1	5,33	38	16	1,42
03/06/2015	0,0243		0,0925			< 5	0,836	38,1	21,3	5,25	27	39	4
03/12/2015	0,0335		0,0408			9	0,773	56,6	21,1	6	20	39	0,96
01/06/2016	0,0764		0,0891			< 5	0,859	37,5	18,7	5,08	29	18	6,26
22/12/2016	0,0224		0,105			7,1	5,98	93	23,5	5,44	37	27	24,5
07/06/2017	0,0449		0,0758			< 5	4,77	30	20,1	5,84	23	62	42,7
06/12/2017	0,0413		0,101			< 5	2,59	37,4	21,6	5,34	< 5	38	1,76
06/06/2018	0,0264		0,0455			< 5	0,973	85,1	18,9	4,74	53	71	7,25
03/12/2018	0,0393		0,0338			< 5	0,437	64	21,9	5,36	49	<5	1,48

Tabela 5. Análises de água subterrânea do poço de monitoramento CR02 sendo os metais apresentados, medidos na forma de metais totais.

Data	Mn (mg/L)	Cr (mg/L)	Al (mg/L)	Cd (mg/L)	Ni (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Fe (mg/L)	Condutividade (mS/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez total (mg/L CaCO ₃)	Turbidez (UNT)
01/01/08	0,014	ND	0,248	ND	ND		0,255			6,2	102		
18/07/08	0,048	0,0028	0,82	ND	ND	3,7	1,8	65	19,8	5,8	61		
29/09/08	ND	N.D	0,078	ND	ND	13,3	0,134	65,9	21,2	6	171		
29/09/09			0,002			1,85		68,2	19,4	6	129	18,5	2,48
15/12/09	0,103	0,002	0,333	< 0,001	< 0,01	< 1	2,02	78	24	6,3	91		
07/06/10			0,041			< 1		62,5	19,3	3,6	53	26,4	1,06
27/12/10	0,004	< 0,01	0,091	< 0,001	< 0,01	4,69	0,116	79,4	21,2	6,3	53	6,24	2,11
09/06/11	< 0,0001		0,0065			< 1	< 0,0001	76	18	6,47	46		0,33
08/12/11	0,00346	< 0,0001	0,0365	< 0,0001	< 0,0001	< 5	0,0872	69	25	6,65	72	8,5	2,5
15/06/12	0,01		0,021			0,5	0,062	60	20	5,82	67	35	1
14/12/12	0,0172	< 0,001	0,104	< 0,001	< 0,001	5	0,1491	144	27	5,95	99	21,4	2,9
18/06/13	0,027		1,287			13,72	0,287	59,9	20,3	5,99	82	11,27	0,75
16/12/13	0,032		1,185			2	0,315	61,1	26,6	6,6	93	7,7	1,97
02/06/14	0,00195		0,0143			< 5	0,025	93	20,2	6,53	91	35,7	0,29
05/12/14	0,001		0,0489			< 5	0,0843	67,7	26,3	6,51	86	<5	0,3
03/06/15	0,00421		0,0221			< 5	0,108	66,2	21,3	5,25	95	<5	0,57
03/12/15	0,00255		0,023			7,1	0,125	72	21,5	6,59	78	16	0,19
01/06/16	0,00146		0,00441			< 5	0,0578	60,1	19,1	5,82	109	15	0,63
22/12/16	0,0115		0,0199			8,6	0,0961	104	23,6	6,29	73	13	1,65
07/06/17	0,00156		0,00234			< 5	0,109	55	19,8	5,81	38	38	0,69
06/12/17	0,00608		0,0148			< 5	0,125	100	23,1	5,7	47	48	4,72
06/06/18	0,00211		< 0,001			< 5	0,055	127	19,7	5,69	91	45	0,34
03/12/18	0,00164		< 0,001			< 5	< 0,001	91	24,2	5,76	101	<5	0,49

Tabela 6. Análises de água subterrânea do poço de monitoramento CR03 sendo os metais apresentados, medidos na forma de metais totais.

Data	Mn (mg/L)	Cr (mg/L)	Al (mg/L)	Cd (mg/L)	Ni (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Fe (mg/L)	Condutividade (mS/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez total (mg/L CaCO ₃)	Turbidez (UNT)
18/07/08	0,506	0,0022	1,3	ND	0,014	271	1,25	805	20,1	3,6	560		
29/09/08	2,22	N.D	13,4	ND	0,046	2387	165	4190	20,2	4,2	2649		
29/09/09			0,638			667		2045	19,1	5,2	1459	257	14,4
15/12/09	1,86	0,002	6,92	< 0,001	0,036	1726	89,5	2112	21,8	3,9	1768		
07/06/10			4,59			384		1026	20,2	5	831	199	16,1
27/12/10	1,19	< 0,01	3,34	< 0,001	0,011	1908	106	1020	20,9	3,9	710	133	28,5
09/06/11	1,115		2,06			727	74,388	1236	20	4,8	694	120,4	9,6
08/12/11	1,761	0,00211	4,029	< 0,0001	0,0159	696	128,598	1396	23	4,7	948	149,5	19
15/06/12	1,3		1,9			627	72,3	991	22	4,41	697	348,3	9
14/12/12	1,0892	0,00259	2	< 0,001	0,00608	404	42,1725	847	26	3,36	665	244,4	7,4
18/06/13	1,057		4,486			286,5	48,19	88,7	21,4	3,95	52	120,75	16,08
16/12/13	1,112		3,982			302,95	32,5	830	24,5	3,5	627	71,5	2,65
02/06/14	1,16		1,54			363,2	38,3	829	21,6	5,66	612	187,7	1,2
05/12/14	1,59		1,86			127	0,545	954	23,4	3,01	611	48	0,53
03/06/15	1,19		1,27			271	41,4	767	22,9	4,11	463	198	4,61
03/12/15	1,47		0,464			383	65,7	780	21	5,7	635	188	151
01/06/16	0,906		0,386			331	24,2	715	21,3	4,66	543	70	57,4
22/12/16	1,31		1,9			156	2,8	776	22,6	3,43	554	57	1,12
07/06/17	0,708		0,57			229	24,8	550	21,5	5,39	379	126	178
06/12/17	1		0,901			299	0,876	751	22,1	3,06	398	47	0,4
06/06/18	1,08		1,07			301	18,1	1470	20,4	3,61	1022	168	9,34
03/12/18	0,879		0,702			296	1,08	303	21,2	3,46	516	105	4,65

De maneira geral, as amostras analisadas junto ao ponto branco (poço CR01 – Tabela 4) apresentam um pH intermediário levemente ácido, comumente apresentando valores entre 5 e 6. Os sólidos totais dissolvidos ocorrem entre valores abaixo de 5 mg/L até 55 mg/L. Os sulfatos ocorrem em geral em teores abaixo de 10 mg/L, à exceção de uma medição (junho de 2013). Foi observado que o Fe (análise em metal total) ocorre, na maioria das vezes, entre 0,3 e 1,5 mg/L com eventual ocorrência de concentrações maiores, até 6,28 mg/L. A condutividade varia entre 23 e 128,9 mS/cm.

Os parâmetros cromo, Ni e Cd foram poucas vezes medidos junto ao CR01, apenas nos anos de 2008 e 2012 e sempre que foram medidos, encontravam-se abaixo do limite de detecção ou de quantificação, à exceção de duas medições de cromo em julho de 2008 e dezembro de 2009 que detectaram 0,0021 e 0,002 mg/L, respectivamente. O Mn_{total} manteve-se estável ao longo do tempo variando entre 0,02 e 0,8 mg/L, diferente do Al_{total} que apresentou resultados desde 0,026 mg/L até 1,015 mg/L. Por fim, a acidez total medida no período apresentou-se comumente abaixo de 71 mg/L CaCO₃. A exceção a estes valores é uma medição de 120,4 mg/L no mês de dezembro de 2011.

Para o poço CR02, a jusante do depósito de rejeitos e cinzas (Tabela 5), o pH observado mostrou-se ligeiramente mais alcalino que o poço CR01, com valores entre 5 e 7. Além disso, os resultados apresentaram teores de sulfatos semelhantes aos do poço CR01, em geral, ocorrendo abaixo de 13,72 mg/L. O Fe total ocorre comumente entre 0,025 e 0,25 mg/L com a ocorrência de uma medição com 2,02 mg/L.

Os sólidos totais dissolvidos em geral apresentam teores de 38 mg/L a 171 mg/L. Já o cromo, o Ni e o Cd, no poço CR02, foram poucas vezes medidos da mesma forma que o poço CR01 – apenas entre 2008 e 2012 – e sempre que medidos, apresentaram valores abaixo do limite de detecção ou de quantificação. As únicas exceções foram duas medições de cromo em julho de 2008 e dezembro de 2009 que detectaram 0,0028 e 0,002 mg/L, respectivamente. O manganês apresentou-se sempre com teores abaixo de 0,1 mg/L da mesma forma que o CR01 e o alumínio, à exceção das análises feitas no ano de 2018, que apresentou forte variação com valores abaixo de 0,001 até 1,287 mg/L. As medições de condutividade resultaram em

valores entre 55 e 144 mS/cm e a acidez total, valores que variaram desde menores que 5 mg/L CaCO₃ até 48 mg/L CaCO₃.

O poço CR03 (Tabela 6) apresentou águas com pH ácido, raramente neutro e comumente variando entre 3 e 4, porém com registro de medições de até 5,66. Os sulfatos apresentaram forte variação atentando especialmente para os resultados de 2008, quando em junho foram observadas concentrações de 271 mg/L, enquanto que, em setembro do mesmo ano, foram observadas medidas de 2387 mg/L. Estas grandes diferenças de valores dentro de um mesmo ano seguem ocorrendo nos anos seguintes de 2009 e 2010, quando, a partir de então, as diferenças de teores dentro do mesmo ano diminuem consideravelmente. Em geral, entre 2008 e 2013 as concentrações de sulfatos se mantiveram estáveis, com valores mínimos e máximos registrados de 156 e 383 mg/L. Tanto o sulfato, em função de sua alta concentração, quanto o pH, em função de seu caráter ácido, são indicadores de contaminação neste poço.

Ainda no que se refere ao poço CR03, as concentrações de Crômio, Ni e Cd também ficaram restritas aos anos de 2008 e 2012. Contudo, diferentemente dos demais poços, foram observadas concentrações acima dos limites de detecção e quantificação de forma constante para os parâmetros Crômio e Ni. O poço CR01 apresentou, em quatro das seis medições realizadas, teores iguais ou acima de 0,002 mg/L. Já os resultados das análises de Ni apresentaram concentrações entre 0,006 mg/L e 0,046 mg/L. O Mn do poço CR03 apresentou concentrações acima dos poços CR01 e CR02, variando de 0,506 mg/L até 2,22 mg/L, da mesma forma que o Al que variou de concentrações de 0,386 mg/L até 13,4 mg/L, em ambos os casos indicando a contaminação das águas. Outro indicativo de contaminação é a condutividade elétrica que mostrou-se elevada principalmente nos primeiros anos com o maior valor sendo observado em dezembro de 2008, um valor de 4190 (mS/cm). O menor valor de condutividade registrado foi o de 88,7 9 (mS/cm). Os sólidos totais dissolvidos também ocorrem relativamente elevados com concentrações de 52 mg/L até 2649 mg/L. Por fim, a acidez total apresenta resultados que variam de 47 mg/L CaCO₃ até 348,3 CaCO₃, porém com valores majoritariamente acima de 100 mg/L CaCO₃.

O efluente tratado (CR07) apresentou, na maioria dos casos, concentrações de Fe total abaixo de 1 mg/L, por vezes abaixo do limite de quantificação de 0,01 mg/L,

com algumas ocorrências acima deste valor que chegam até 10,9 mg/L. O Al comumente apresentou valores desde abaixo do limite de quantificação (0,01 mg/L) até 2 mg/L, tendo alcançado teores maiores de até 3,88 mg/L. O Mn, assim como o Fe e o Al foram medidos durante toda a série histórica e sua concentração variou desde abaixo do limite de quantificação (0,01 mg/L) até 1,2 mg/L. Em geral, estes últimos valores citados demonstram a eficácia do tratamento implementado na ETE para a remoção do Fe e do Al.

Ressalta-se, contudo, que o Fe total, o Al e o Mn tiveram as maiores concentrações medidas em outubro de 2008 com 93 mg/L e 29 mg/L e 2,42 mg/L, respectivamente. Estas medições destoam completamente da série histórica, e conforme será possível acompanhar no subitem 5.1 ANÁLISES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E DE EFLUENTES, serão interpretadas como não representativas já que podem refletir diversos fatores não correlatos à evolução da contaminação e sim um eventual erro de medição ou um evento pontual.

Diferentemente dos metais supracitados, o Ni e Cd foram medidos trimestralmente entre os anos de 2008 e 2012 e todos apresentaram como teores mínimos, teores abaixo de seus limites de quantificação de 0,01, 0,001 mg/L, respectivamente. Como maiores teores, o Ni apresentou o valor de 0,065 mg/L em outubro de 2008, mesmo mês dos altos teores de Fe total, Al e Mn supracitados. A exceção desta data, o maior teor de Ni registrado foi de 0,012 mg/L em maio de 2008. Já o Cd apresentou como maior valor de teor registrado o de 0,0083 mg/L em fevereiro de 2009. Ressalta-se que a partir da última medição de 2009, todos os teores observados de ambos estes parâmetros estiveram abaixo de seus respectivos limites de detecção.

O Cr, da mesma forma que o Ni e o Cd, foi medido trimestralmente entre o ano de 2008 e 2012. Contudo diferentemente destes parâmetros, o Cr teve alteração em seu método de detecção de forma que até o final de 2010 as medições tinham um limite de detecção dos teores de até 0,001 mg/L enquanto a partir de 2011 as medições possuem um limite de detecção de 0,01 mg/L. De todo modo, todas as medições realizadas apresentaram resultados abaixo de 0,01 mg/L, sendo a maior no período até 2010 de 0,0034 mg/L.

A condutividade, variou entre 306 e 5120 ms/cm enquanto o pH teve como maiores e menores valores 3,1 e 8,84. A concentração de sulfatos variou de 25 até 2639 mg/L. A acidez do efluente tratado teve como maior valor observado o de 502 mg/L.CaCO₃, em outubro de 2008, mesma dos altos teores de Fe total, Al e Mn supracitados. À exceção desta data, o maior valor de acidez observada foi o de 99,8 mg/L.CaCO₃ em outubro de 2010. Os sólidos totais dissolvidos medidos até o final de 2012 tiveram como concentrações máximas e mínimas medidas 292 mg/L e 3358 mg/L.

No que se refere ao efluente bruto (CR12), a Tabela 14 apresenta como maiores teores de concentração de Fe total, Al e Mn as concentrações de 247 mg/L, 43 mg/L e 7,07 mg/L, respectivamente, sendo todas estas registradas entre janeiro e março de 2009, no início da série histórica. Por outro lado, os menores valores que se tem registro destes parâmetros são 0,601 mg/L de Fe total, 0,436 mg/L de Al e 0,06 mg/L de Mn, sendo todos estes valores observados no final da série histórica, entre o final de 2018 e o início de 2019.

Os parâmetros Ni, Cd, Cr, condutividade e os sólidos totais dissolvidos, da mesma forma que no efluente tratado, foram medidos somente entre 2008 e 2012 no efluente bruto. O Ni teve como maior valor observado na média histórica, a sua primeira medição em fevereiro de 2008, como 0,151 mg/L e como menor valor uma única medição abaixo do limite de quantificação em outubro de 2010. O Cd apresentou concentrações acima do limite de quantificação apenas em medições anteriores a dezembro de 2009, sendo o maior valor observado de 0,083 mg/L. O Cr, da mesma forma que no efluente tratado, teve seu método de análise alterado durante a série histórica, porém, em geral, suas medições apresentaram sempre valores abaixo de 0,01 mg/L.

A condutividade variou entre 486 mS/cm e 7100 mS/cm, Contudo, o valor de 486 mS/cm pode ser considerado um *outlier* haja vista que o mesmo destoa da série histórica que, à exceção deste, apresentou valores sempre acima de 1750. Os sólidos totais dissolvidos variaram de 1379 mg/L até 3870 mg/L.

O pH manteve-se ácido durante toda a média histórica variando de 2,1 até 4,44 e o sulfato manteve-se alto, como esperado para um efluente de DAM, porém apresentou forte variação de 291 mg/L até 3960 mg/L.

Além dos dados de 2008, também é possível utilizar os resultados das análises físicas, químicas e físico-químicas das águas subterrâneas de Binotto (1997) para um melhor entendimento da evolução temporal. A relação da qualidade da água que constam nas análises dos poços instalados e avaliados por Binotto, em 1997 (P1, P2, P4, P5 e P8) com os poços analisados neste trabalho (CR01, CR02 e CR03) estão disponíveis nas Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9. Tais tabelas igualmente estabelecem a comparação dos resultados com os limites da Resolução Conama 396/2008.

Tabela 7. Comparação entre análises químicas e físico- químicas de águas subterrâneas do poço de Binotto (1997) a montante do depósito com o poço CR01, e sua relação com os valores máximos permitidos menos conservadores (número em vermelho) e mais conservadores (número e quadro em vermelho) do Conama nº 396/2008.

Parâmetro	Conama nº 396/2008		Análises em poços a montante								
			Binotto (1997)							2018	
	Mais conservador	Menos conservador	P6							CR01	
			Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Junho	Dezembro
Al (mg/L)	0,2 *	5 **	7,45	-	-	0,478	0,4615	0,4785	0,7145	0,0455	0,0338
Cd (mg/L)	0,005 *	0,05 **	0,000472	-	-	0,0003	<0,000158	0,000374	0,00045	-	-
Cloreto	250 *	700 **	-	-	-	-	-	-	-	5,36	3,58
Co (mg/L)	0,05 ***	1 ****	0,004355	-	-	<0,000406	<0,00234	0,003915	<0,00209	-	-
Crômio (mg/L)	0,05 *	1 **	0,003155	-	-	0,00036	<0,000385	<0,000148	0,00118	-	-
Cu (mg/L)	0,5	2	0,0247	-	-	0,00133	0,0013	0,001485	0,00021	< 0,001	< 0,001
Fe total (mg/L)	0,3 *	5 ***	-	-	-	-	0,66	1,68	0,71	0,973	0,437
Hg (mg/L)	0,001 *	0,01 **	-	-	-	-	-	-	-	< 0,0001	< 0,0001
Mn (mg/L)	0,05 **	0,2 ***	0,177	-	-	0,0218	0,1465	0,105	0,0579	0,0264	0,0393
Mo (mg/L)	0,01 ***	0,15 **	<0,000442	-	-	<0,00233	<0,000413	<0,00112	<0,000235	-	-
Ni (mg/L)	0,02 *	1 **	<0,00177	-	-	0,00624	0,0067	0,00624	0,00262	-	-
Nitrato (mg/L)	10 *	90 **	-	-	-	-	-	-	-	< 0,300	0,97
Nitrito (mg/L)	1 *	10 **	-	-	-	-	-	-	-	< 0,01	0,24
Pb (mg/L)	0,01 *	5 ***	0,2565	-	-	0,0177	0,0173	0,0167	0,01425	< 0,001	< 0,001
Sulfato (mg/L)	250 *	1.000 ***	-	-	-	<5,00	8	34	24,2	< 5	< 5
Zn (mg/L)	2 ***	24 **	0,0976	-	-	0,0344	0,0344	0,0233	0,03745	-	-
Condutividade (mS/cm)	-	-	52,2	-	-	42,2	97	88,1	44,5	85,1	64
pH	-	-	7,22	-	-	5,6	4,62	4,86	4,94	4,74	5,36
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	-	1000 **	26,4	-	-	16,4	47,6	40,3	22,5	53	49
Temperatura (°C)	-	-	24	-	-	17,7	16,9	18,2	22,5	18,9	21,9

*Consumo Humano

**Dessedentação de animais

***Irrigação

****Recreação

Tabela 8. Comparação entre análises químicas e físico-químicas de águas subterrâneas dos poços de Binotto (1997) a jusante do depósito com o poço CR02, e sua relação com os valores máximos permitidos menos conservadores (número em vermelho) e mais conservadores (número e quadro em vermelho) do Conama nº 396/2008.

Parâmetro	Conama nº 396/2008		Análises em poços a jusante														2018 CR02	
			Binotto (1997) P5							P8								
	Mais conservador	Menos conservador	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Junho	Dezembro
Al (mg/L)	0,2 *	5 **	1,264	1,0325	1,148	0,142	0,242	0,1265	0,142	3,1885	1,7635	2,476	0,108	0,1087	0,1365	0,0848	< 0,001	< 0,001
Cd (mg/L)	0,005 *	0,05 **	0,000611	0,000585	<0,000145	0,000132	<0,000158	0,000151	0,00083	0,0005	0,000093	<0,000145	0,00035	<0,000158	0,00037	0,00029		
Cloreto	250 *	700 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,71	1,92
Co (mg/L)	0,05 ***	1 ****	0,0658	0,04555	0,007	0,006725	0,00398	0,005765	0,00465	0,0018	<0,00034	<0,00034	<0,000406	<0,00234	<0,0013	<0,00209		
Crômio (mg/L)	0,05 *	1 **	<0,000262	0,0013	0,001	0,0000735	<0,000385	<0,000148	0,00055	0,0014	0,0013505	0,0006	<0,000096	<0,000385	<0,000148	0,00061		
Cu (mg/L)	0,5	2	0,006785	0,02495	0,016	0,015868	0,005825	0,00615	0,00347	0,018	0,009625	0,013788	0,00077	0,002275	<0,000766	0,00049	< 0,001	< 0,001
Fe total (mg/L)	0,3 *	5 ***	-	-	-	-	9,94	6,88	5,1	-	-	-	-	0,29	2,92	5,23	0,055	< 0,001
Hg (mg/L)	0,001 *	0,01 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0001	0,000146
Mn (mg/L)	0,05 **	0,2 ***	0,984	1,0995	0,406	0,2505	0,251	0,132	0,149	0,0854	0,04	0,02275	0,01845	0,024	0,02535	0,0249	0,00211	0,00164
Mo (mg/L)	0,01 ***	0,15 **	<0,00107	<0,00107	<0,00107	<0,00233	<0,000413	<0,00112	0,00044	<0,00107	<0,00107	<0,00107	<0,00233	<0,000413	0,00151	0,00075		
Ni (mg/L)	0,02 *	1 **	0,002175	<0,00177	<0,00177	0,002595	0,002595	0,002995	0,00105	<0,00177	<0,00177	<0,00177	0,00248	0,00248	0,002995	<0,000474		
Nitrato (mg/L)	10 *	90 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,300	< 0,3
Nitrito (mg/L)	1 *	10 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,01	< 0,01
Pb (mg/L)	0,01 *	5 ***	0,202	0,1004	0,151	0,01645	0,0159	0,01645	0,0261	0,1295	0,113	0,1215	0,02025	0,02025	0,0255	0,0126	< 0,001	0,00476
Sulfato (mg/L)	250 *	1.000 ***	<5	<5	<5	<5	<5	28	15,2	6,4	6	7	6	<5,00	12	15,5	< 5	< 5
Zn (mg/L)	2 ***	24 **	0,1985	0,1235	0,161	0,0276	0,0276	0,0229	0,0373	0,193	0,08325	0,138125	0,0268	0,0312	0,02395	0,0268		
Condutividade (mS/cm)	-	-	144,5	96,4	96,4	58,7	64,6	51,1	58,6	152,7	79,9	66,2	53,7	56,8	48,8	46,9	127	91
pH	-	-	6,1	7,24	7,24	5,58	5,7	6,05	5,8	6,05	7,12	6,84	3,97	5,49	5,19	5,31	5,69	5,76
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)		1000 **	72,3	48	48	28,9	32	25,6	29,7	78,8	38,8	32,8	27,1	28,2	23,3	22	91	101
Temperatura (°C)	-	-	24	20,4	17,5	16,7	16,5	18,2	23,7	23,2	21,5	19,4	20,8	19,3	18,7	23,9	19,7	24,2

*Consumo Humano

**Dessedentação de animais

***Irrigação

****Recreação

Tabela 9. Comparação entre análises químicas e físico-químicas de águas subterrâneas dos poços de Binotto (1997) a dentro do depósito com o poço CR03, e sua relação com os valores máximos permitidos menos conservadores (número em vermelho) e mais conservadores (número e quadro em vermelho) do Conama nº 396/2008.

Parâmetro	Conama nº 396/2008		Análises em poços dentro do depósito														2018 CR03	
			Binotto (1997)															
	Mais conservador	Menos conservador	P1								P2						Junho	Dezembro
			Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro		
Al (mg/L)	0,2 *	5 **	0,08765	0,0793	0,083	0,081	0,0811	0,1925	0,03015	120	318,5	219,3	281,55	248,4	281,55	356,85	1,07	0,702
Cd (mg/L)	0,005 *	0,05 **	0,0007455	0,000795	0,002	9E-04	0,0007	<0,122	0,00287	0,0079	0,0084	0,009	0,00739	0,0089	0,007735	0,0121	-	-
Cloreto	250 *	700 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,21	3,86
Co (mg/L)	0,05 ***	1 ****	0,02975	0,0404	0,052	0,056	0,0414	0,0587	0,1215	0,0674	0,0506	0,041	0,0517	0,0681	0,0853	0,157	-	-
Crômio (mg/L)	0,05 *	1 **	<0,000262	0,001425	0,002	0,001	<0,000385	0,000975	0,00578	0,0208	0,0307	0,026	0,0263	0,0369	0,0419	0,0817	-	-
Cu (mg/L)	0,5	2	0,00287	<0,367	0,002	0,001	<0,00133	0,000939	0,00187	0,0079	0,006	0,007	0,02145	<0,00133	0,02145	0,03125	0,00153	0,00131
Fe total (mg/L)	0,3 *	5 ***	16,06	19,4	66,27	48,11	73,66	110,36	292,16	1273	1381	1477	1672,44	2448,6	2772,86	3096,89	18,1	1,08
Hg (mg/L)	0,001 *	0,01 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,0001	< 0,0001
Mn (mg/L)	0,05 **	0,2 ***	0,555	0,536	0,769	0,688	0,8105	0,8025	1,497	3,031	3,0025	2,926	2,6595	3,065	2,732	2,993	1,08	0,879
Mo (mg/L)	0,01 ***	0,15 **	<0,00107	<0,00107	0,00107	<0,00233	<0,000413	<0,00112	<0,000235	<0,00107	<0,00107	0,00107	<0,00233	<0,000413	<0,00112	<0,000235	-	-
Ni (mg/L)	0,02 *	1 **	0,00318	0,00425	0,004	0,01	0,0102	0,00824	0,0376	0,172	0,179	0,176	0,216	0,2065	0,216	0,361	-	-
Nitrato (mg/L)	10 *	90 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,66	1,44
Nitrito ((mg/L))	1 *	10 **	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0,01	< 0,01
Pb (mg/L)	0,01 *	5 ***	0,02515	0,02105	0,023	0,024	0,0175	0,0243	0,03915	0,1415	0,1335	0,138	0,183	0,2005	0,212	0,1145	0,00423	0,00724
Sulfato (mg/L)	250 *	1.000 ***	269	735	-	520	525	535	855	3784	5040	-	3300	6200	6700	6600	301	296
Zn (mg/L)	2 ***	24 **	0,399	1,071	0,735	1,463	1,4635	0,983	1,9035	2,321	0,9855	1,635	1,336	1,336	0,8585	0,9915	-	-
Condutividade (mS/cm)	-	-	875	1266	1440	1099	1235	1150	1773	4200	4140	4290	5520	7260	8150	8480	1470	303
pH	-	-	6	6,85	5,85	5,6	5,78	5,85	6,04	3,89	5,46	3,78	3,8	3,93	3,91	4,03	3,61	3,46
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)		1000 **	439	632	708	547	615	571	893	2130	2040	2120	2750	3570	3930	4250	1022	516
Temperatura (°C)	-	-	26,3	23,1	21,6	22,4	21,9	21,9	24,3	25,9	23,8	21,2	22,2	21,3	21,3	23,6	20,4	21,2

*Consumo Humano

**Dessedentação de animais

***Irrigação

****Recreação

Para os poços a montante, é possível observar uma correlação direta entre o poço CR01 e P6 com valores semelhantes em todos os parâmetros observados, à exceção do Al (entre 10 e 20 vezes maior nos poços de Binotto, 1997) Mn e do Pb que para o poço P6 apresentou teores mais elevados, por vezes acima dos limites estabelecidos pelo Conama nº 396/2008. Diferentemente do poço P6, o poço CR01, para as análises de 2018, apresentou-se dentro dos limites da resolução supracitada em todos os parâmetros observados.

Da mesma forma, as amostras coletadas junto ao poço CR02, para as análises realizadas no ano de 2018, apresentaram-se dentro dos limites do Conama nº 396/2008 em todos os parâmetros analisados. Diferentemente deste, os poços antigos apresentavam comumente elevados teores de Fe, Mn, Al e Pb os quais encontravam-se acima dos limites estabelecidos pela resolução.

Os resultados dos poços antigos dentro do depósito, se comparados entre si, já demonstram uma forte variação nas concentrações de diversos teores, de forma que, com frequência, o poço P2 apresentava maiores concentrações de diversos parâmetros, em especial metais, em relação ao poço P1. Em geral, em todas as campanhas, os parâmetros como Al, Cd, Co, Cr, Fe total, Mn, Pb e sulfato, Zn e STD apresentaram - em pelo menos uma oportunidade - teores acima dos limites estabelecidos pelo Conama nº 396/2008. Todos estes parâmetros ainda se apresentaram, pelo menos em uma oportunidade, acima dos limites estabelecidos pela resolução no poço CR03, com exceção dos parâmetros Cd, Co, Cr, Ni, e Zn, que não possuem medições recentes (2008 em diante) e, portanto, não puderam ser avaliados.

4.2 PRECIPITAÇÃO TOTAL MENSAL

A seguir será apresentada a Tabela 10, com o levantamento da precipitação na região estudada ao longo do período de 2008 a 2019. Os resultados ali contidos serão utilizados para a confecção dos gráficos de variação dos parâmetros com possíveis indicadores de contaminação, de forma a avaliar uma eventual correlação entre a precipitação no período citado e a concentração de tais parâmetros.

Já a Tabela 11 dispõe das máximas e mínimas de precipitação para cada mês do ano, a média dos meses neste período e o desvio padrão como forma de avaliar a variação.

Tabela 10. Precipitação Total Mensal em mm entre os anos de 2008 e 2019.

Precipitação Total Mensal (mm)												
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2008	105	72,1	75,1	125,2	220,7	124,8	138,4	121,9	156,5	219,5	21,8	120,6
2009	169,6	111,4	72,6	31	106,1	57,1	57,2	264,5	293,7	125	287,6	143,8
2010	173,7	110,9	103,1	71,6	119,9	204,6	170,2	95,5	180,8	57,8	72,1	92,9
2011	135,7	119,5	83,1	172,7	50,1	109,6	225,7	182,3	53	123,7	13,7	52,1
2012	166	139,5	122,7	77,1	35,7	31,9	144,9	93,6	273,7	121,1	26	196
2013	106,1	112,8	78	108,9	65,3	100,7	115,9	247,4	135,3	131,8	184,6	76,6
2014	76,8	147,7	126,4	83,5	71	228,6	253,5	129,1	154,2	185,3	101,9	172,2
2015	160,4	95	52,9	72,5	136	170	309,2	108,9	184	307,3	123,7	100,2
2016	109,4	138,6	302,4	215,9	72,5	6,8	150,7	98,8	90,6	191,6	103,9	128,1
2017	197,1	50,5	165,6	114,9	184,5	196,9	18,7	105,9	164,7	290,4	137,9	153,5
2018	150	119,1	99,4	103,3	88,2	149,8	186,5	123	168	91	125,3	61,6
2019	101,1	111,1	78,2	241,1	245,1	44,4	158,3	77,4	91,9	280,1	90,9	19,1

Tabela 11. Máximas, mínimas, média de precipitação para cada mês do ano dos meses entre os anos de 2008 e 2018 e o desvio padrão de cada mês neste período.

Precipitação Total Mensal (mm)				
Mês	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
Jan	76,8	137,57	197,1	35,63
Fev	50,5	110,68	147,7	26,60
Mar	52,9	113,29	302,4	64,03
Abr	31	118,14	241,1	59,68
Mai	35,7	116,26	245,1	65,12
Jun	6,8	118,77	228,6	70,11
Jul	18,7	160,77	309,2	76,04
Ago	77,4	137,36	264,5	58,70
Set	53	162,20	293,7	66,71
Out	57,8	177,05	307,3	78,99
Nov	13,7	107,45	287,6	73,17
Dez	19,1	109,72	196	50,17

É possível observar, na Tabela 11, que a precipitação apresentou uma grande variação nos meses do período de 2008 a 2019. Tome-se por exemplo o mês de abril: em 2008, a precipitação foi de 31mm ao longo do mês, enquanto que no ano de 2016, tivemos uma precipitação em abril, de 215,9mm. Em geral, os meses com a maior

média de precipitação foram os meses de setembro e, principalmente, outubro, seguidos dos meses de janeiro e agosto. Também a destacar que, outubro, além de ter sido o mês com maior média de precipitação, também foi o que apresentou o maior desvio padrão entre os todos os meses. Janeiro e fevereiro apresentaram o menor desvio padrão, porém, enquanto o mês de fevereiro dispõe da segunda menor média de precipitação, o mês de janeiro apresenta a terceira maior média.

De maneira geral, o levantamento da precipitação ao longo do ano demonstrou que efetivamente não há um período específico seco na região e que em geral as chuvas ocorrem esporçãs ao longo do ano. Este tipo de variação torna análises semestrais dos parâmetros pouco eficazes no que se refere à avaliação de sua variação em relação a precipitação total mensal.

4.3 VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS ASSOCIADOS À DAM NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO CAPÃO DA ROÇA

Os gráficos relativos aos poços CR01, CR02 e CR03 apresentam a relação entre a evolução temporal dos principais parâmetros associados a DAM (Fe, Mn, Al, pH, sulfatos, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos) e constam da Figura 27 à Figura 50 do presente capítulo.

Estes gráficos apresentam a variação sequenciada temporalmente dos parâmetros supracitados do período 2008-2019, nos poços citados e adicionalmente serão inseridos os valores da precipitação total mensal para avaliação da influência do fator climático junto aos resultados.

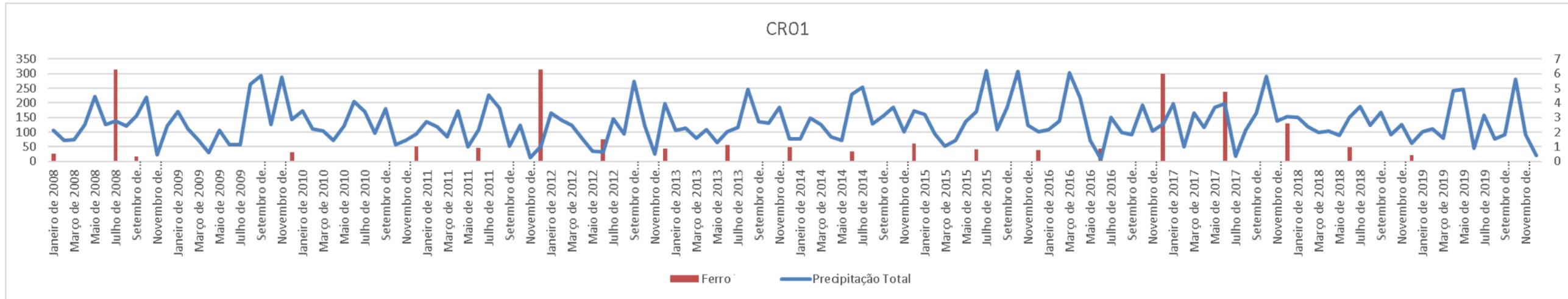


Figura 27. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

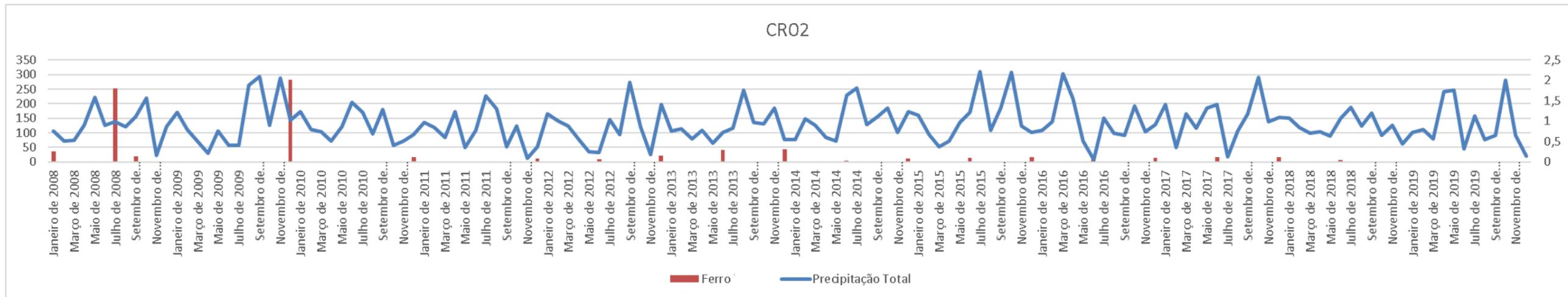


Figura 28. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

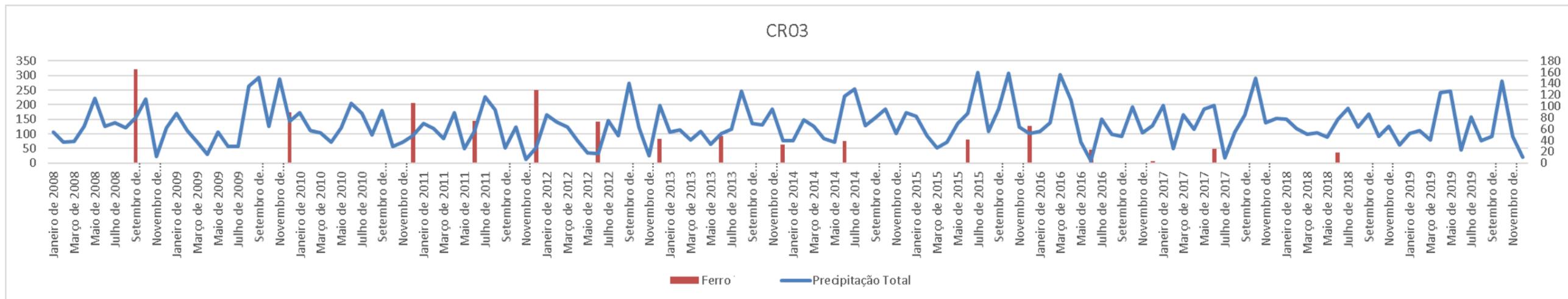


Figura 29. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

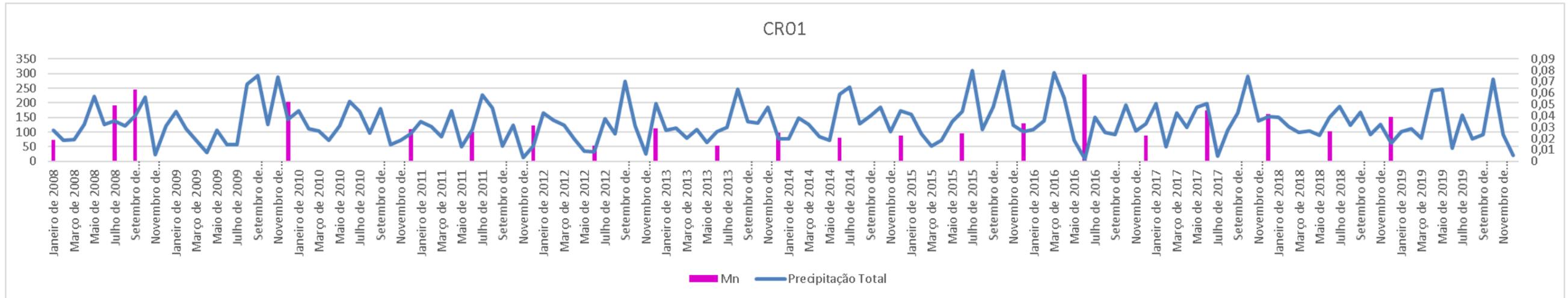


Figura 30. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

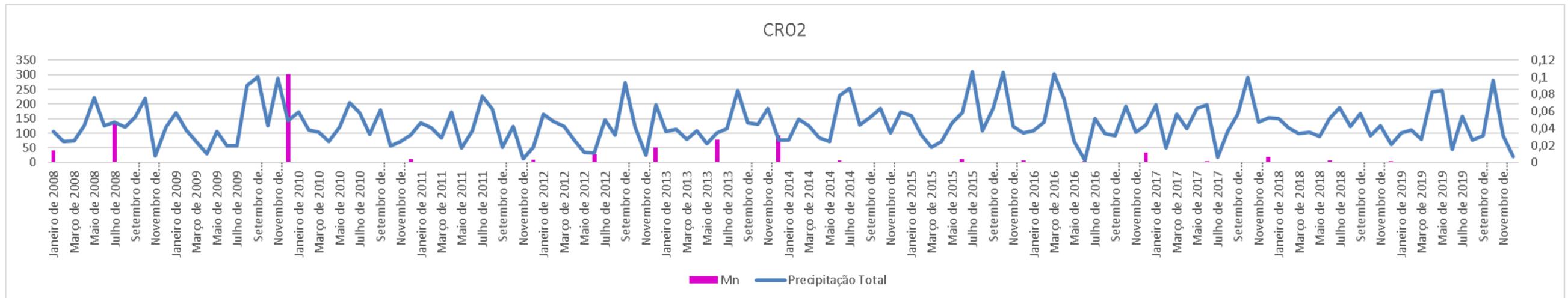


Figura 31. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

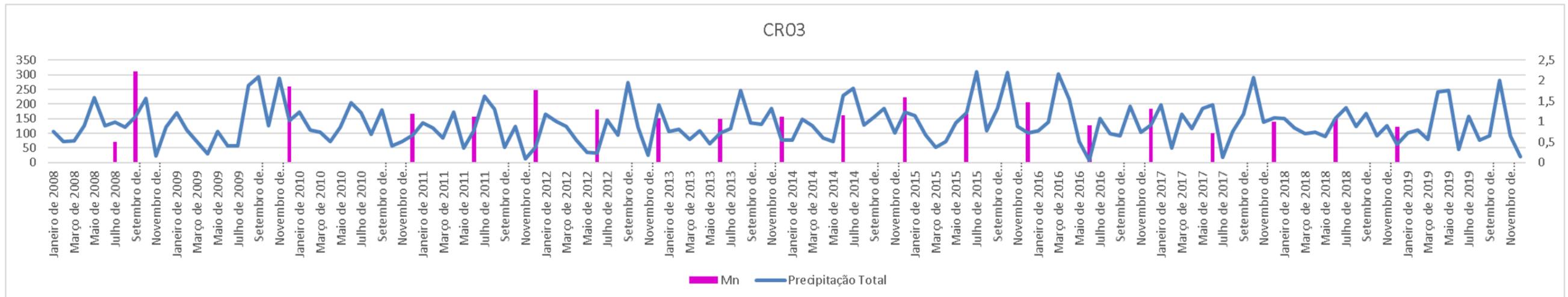


Figura 32. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

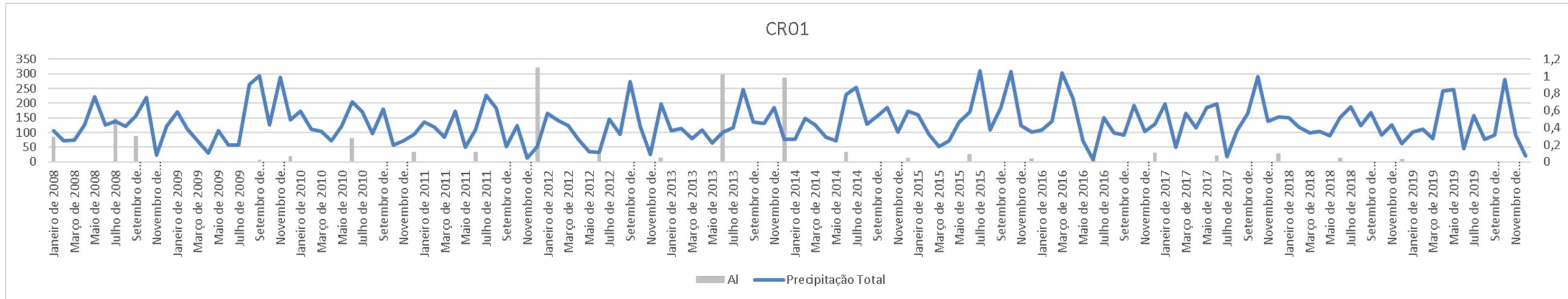


Figura 33. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

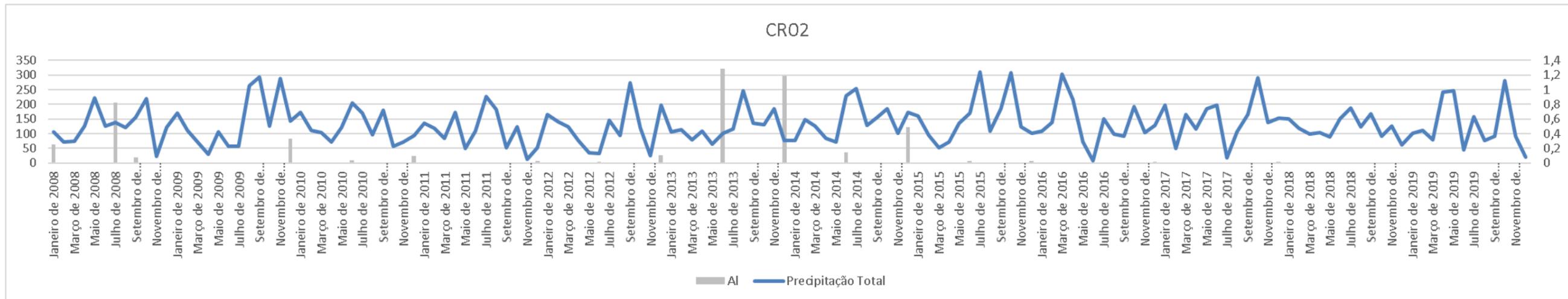


Figura 34. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

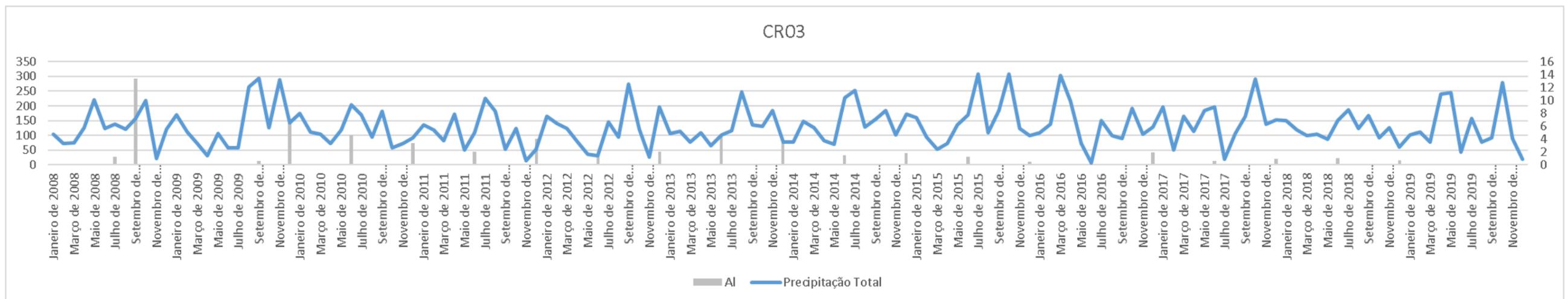


Figura 35. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

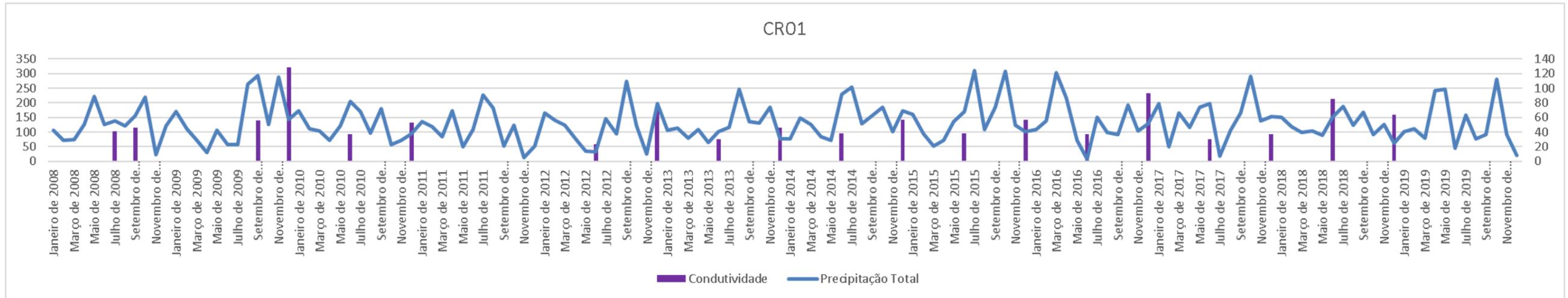


Figura 36. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.

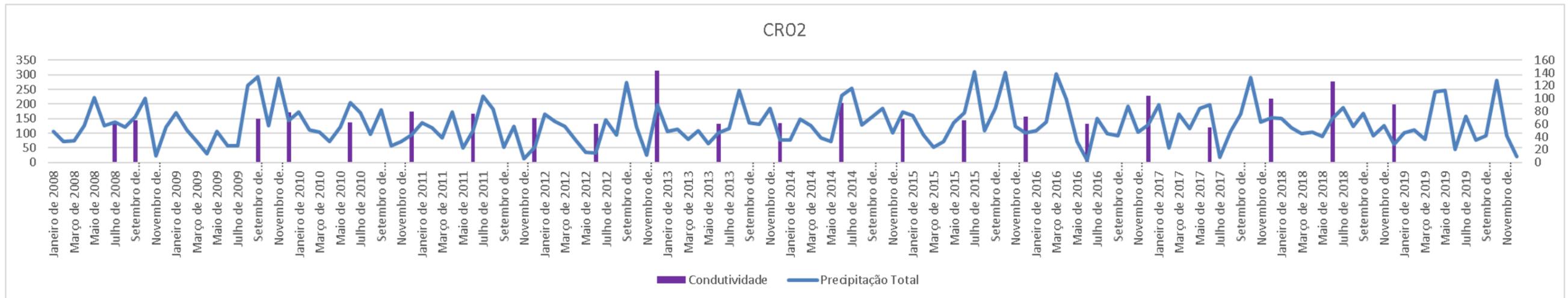


Figura 37. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.

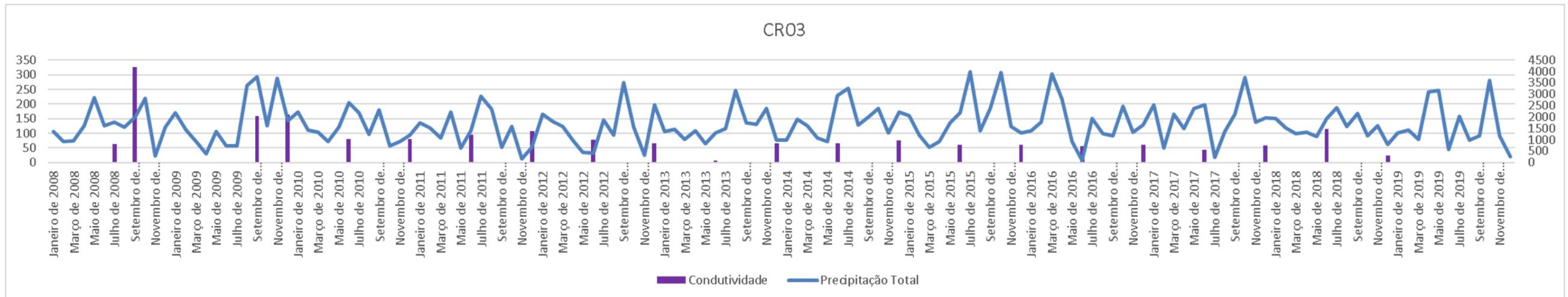


Figura 38. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.

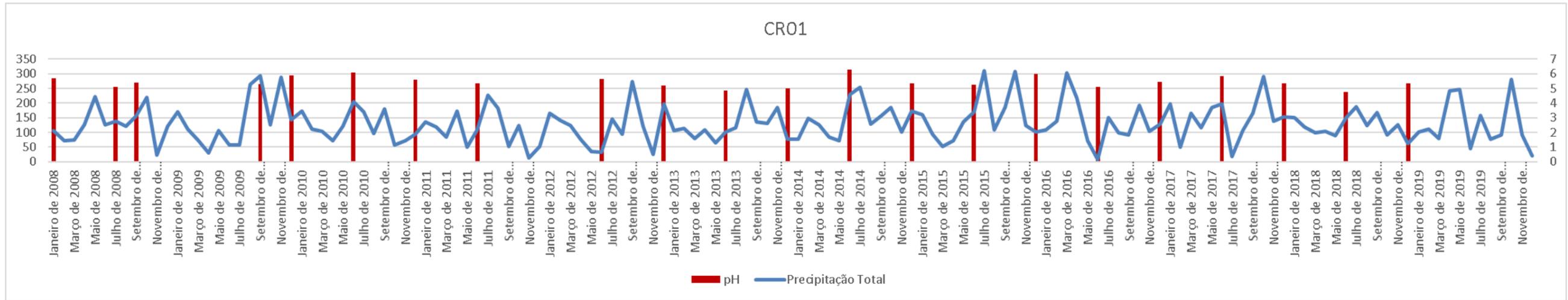


Figura 39. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.

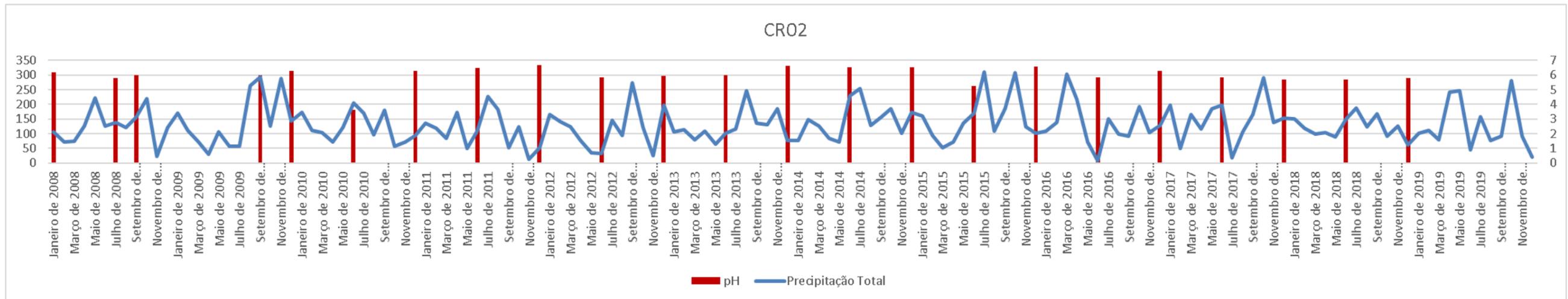


Figura 40. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.

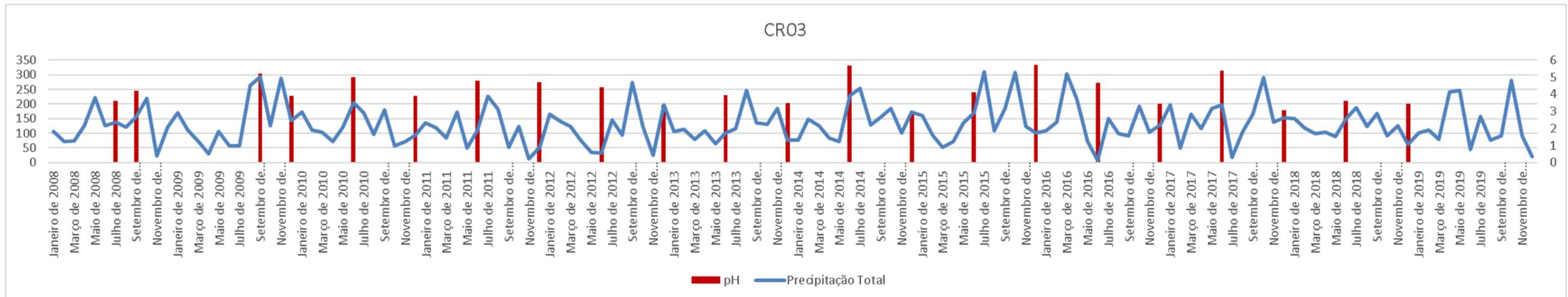


Figura 41. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.

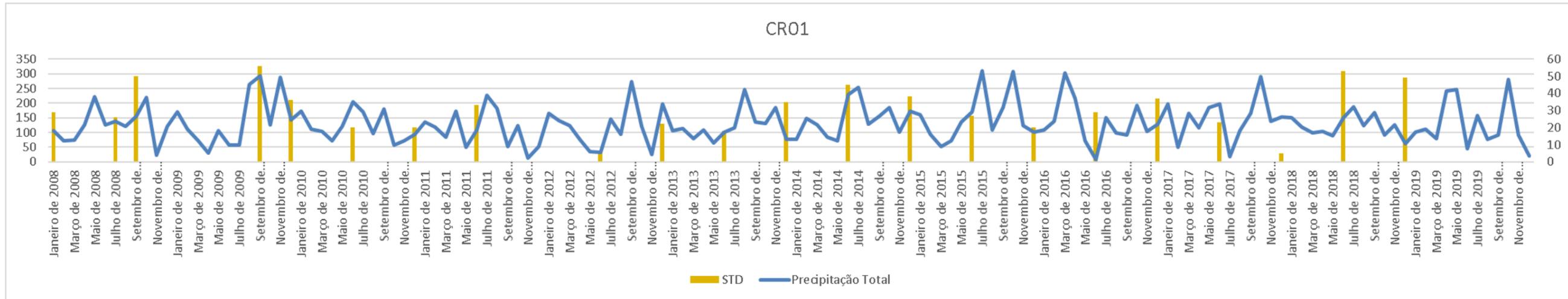


Figura 42. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de STD realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L..

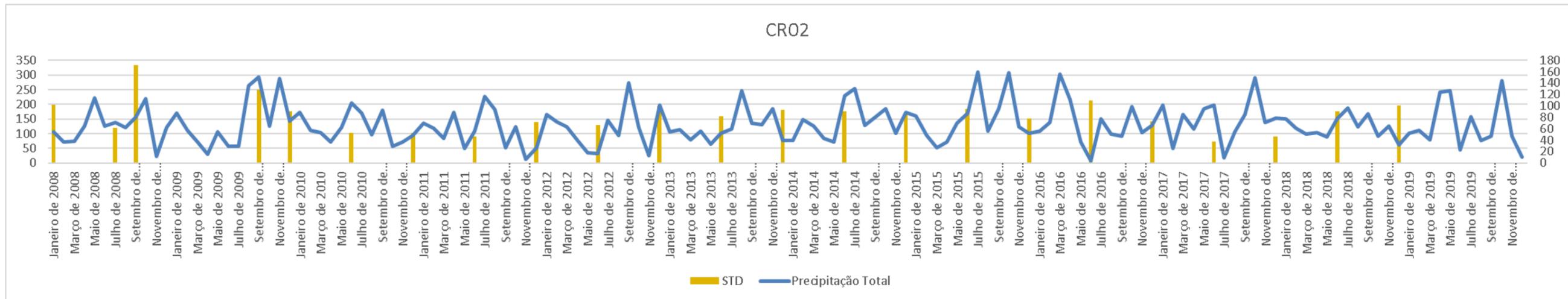


Figura 43. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de STD realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L..

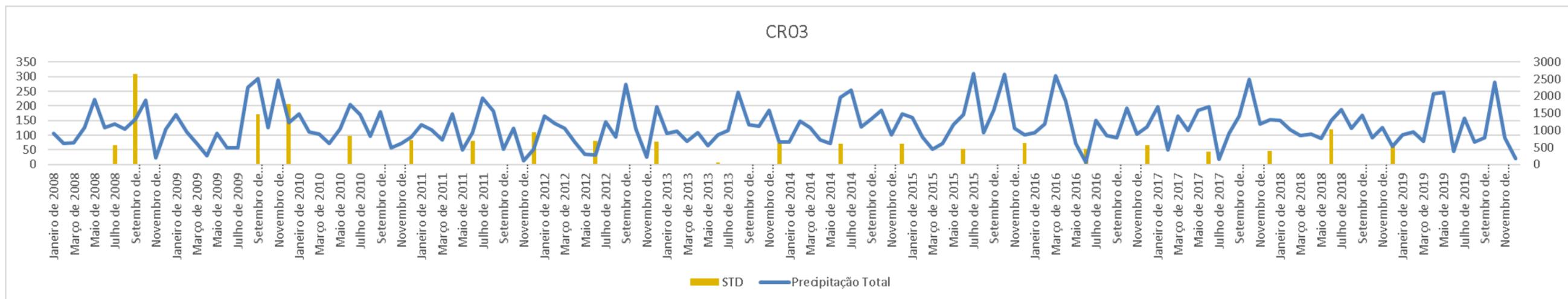


Figura 44. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de STD realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L..

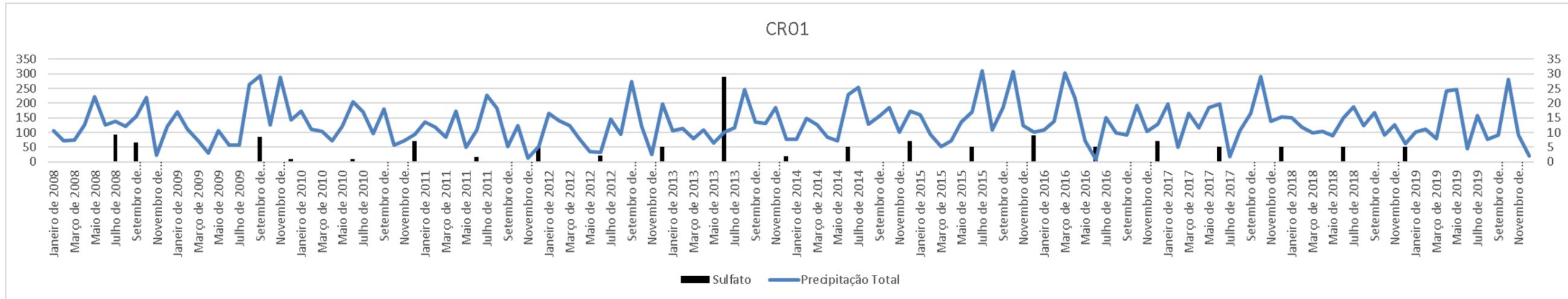


Figura 45. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

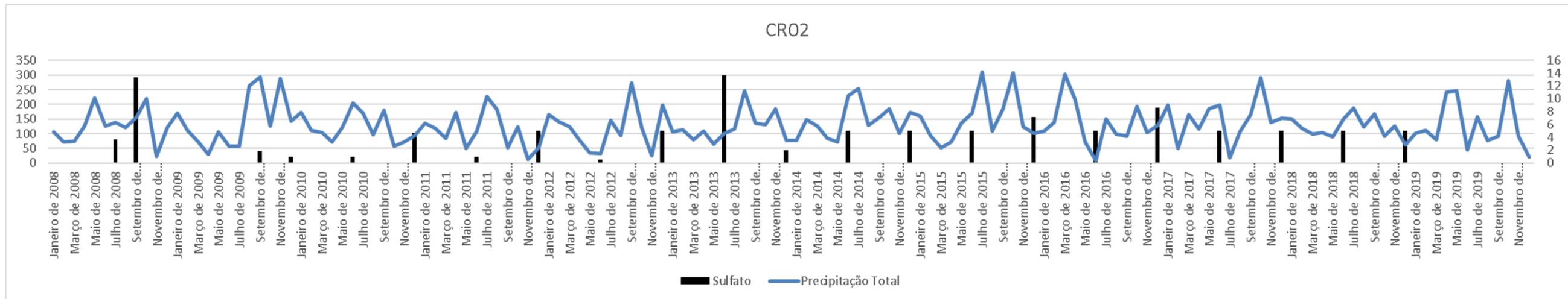


Figura 46. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

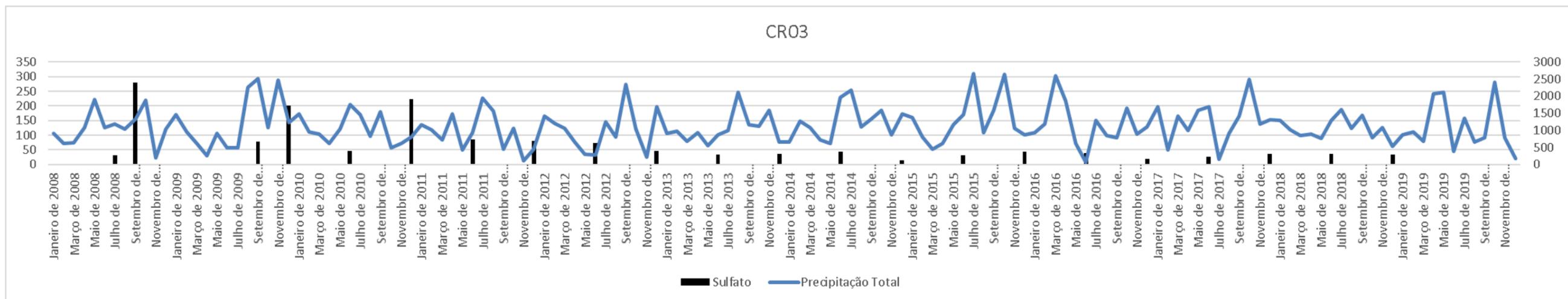


Figura 47. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

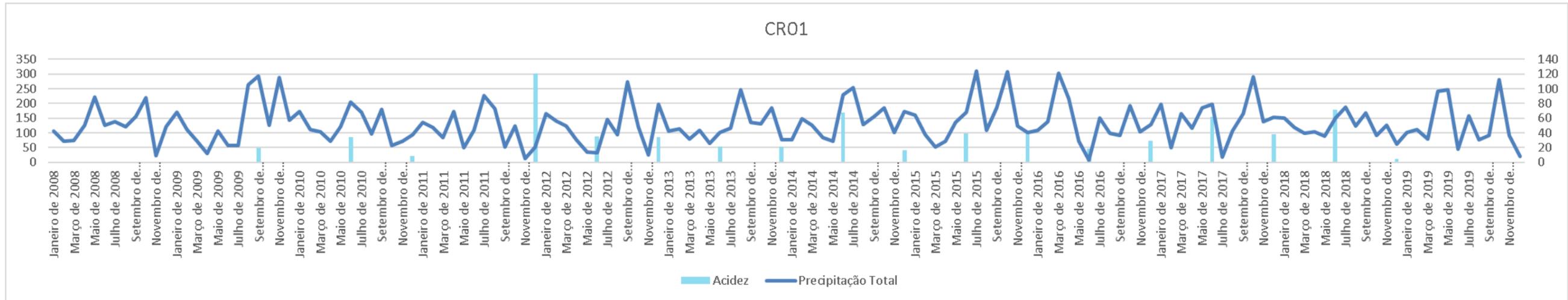


Figura 48. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR01 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃.

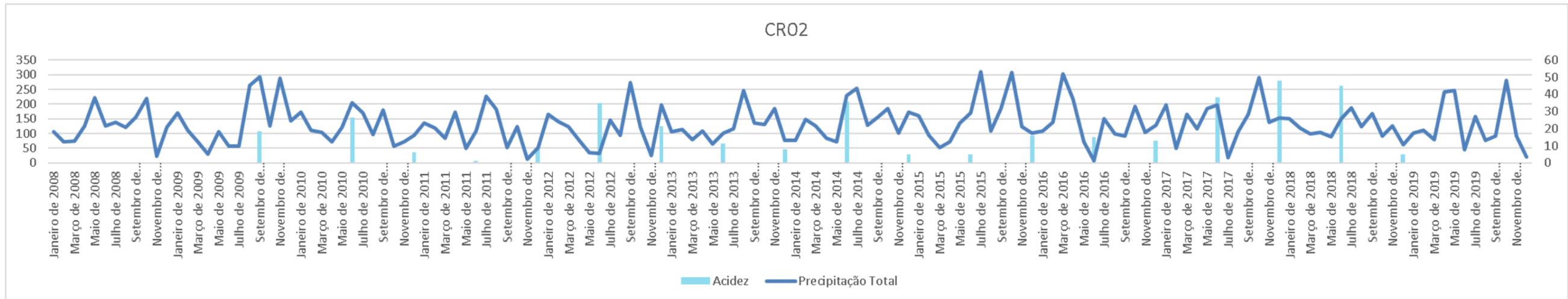


Figura 49. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR02 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃.

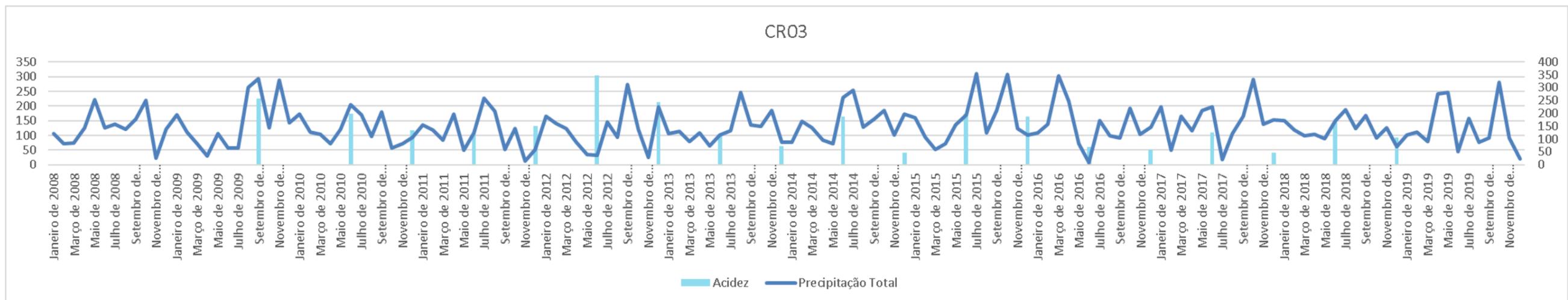


Figura 50. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao poço CR03 e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo a esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃.

Conforme pode ser observado nas Figura 27 à Figura 50, não há um padrão claro de evolução ou de alteração dos contaminantes com a intensidade da precipitação em nenhum dos gráficos associados aos poços CR01 e CR02. Mais especificamente, para os gráficos correlatos ao parâmetro Fe_{total} , a presença de algumas medições muito acima dos demais valores não é seguido em geral por uma queda abrupta e um retorno dos valores abaixo de 1 mg/L para o poço a montante e abaixo de 0,5 mg/L para o poço a jusante. A exceção a isto são as medições de dezembro de 2016 que, após o registro de um pico de aproximadamente 6 mg/L, apresentou em sequência uma queda gradual até valores abaixo de 0,5 mg/L. Contudo, ressalta-se que estes valores são em geral, relativamente baixos e pouco representativos para uma interpretação mais coesa.

Os gráficos dos resultados de manganês (Figura 30 e 31), alumínio (Figura 33 e 34) e sulfatos (Figura 45 e 46) dos poços a montante e a jusante, assim como os correlatos ao parâmetro Fe_{total} neste poços, apresentaram uma aleatoriedade nas medições ao longo do tempo e conforme a precipitação total mensal registrada no período. Esta aleatoriedade dos íons também se reflete na condutividade (Figura 36 e 37) e na acidez (Figura 48 e 49).

Diferentemente dos poços CR01 e CR02, contudo, os gráficos associados ao poço localizado dentro do depósito (CR03), dispõe claramente de um padrão bem definido de queda gradual nas concentrações do Fe (Figura 29). O Mn (Figura 32) apresenta uma aparente queda, porém menor expressiva quantitativamente em relação ao Fe. O Al (Figura 35) e os sulfatos (Figura 47), também demonstra este padrão de queda gradual ao longo do tempo, porém com registro de resultados relativamente baixos em meio aos altos valores observados no início da série histórica. Não se observa relação das concentrações com a pluviometria.

Esse padrão de queda gradual ao longo do tempo se reflete tanto na condutividade (Figura 38) e, apesar de menos expressivamente, nos resultados de sólidos totais dissolvidos (Figura 44). Contudo, tal padrão não se reflete na acidez total (Figura 50) que não apresenta uma queda sólida ao longo da série histórica. Outro padrão esperado que não foi observado foi a estabilização do pH (Figura 41), que apesar de, por algumas vezes oportunidades na série histórica ter apresentado

valores relativamente neutros, próximos de 6, nas últimas três oportunidades apresentou valores entre 2 e 4.

4.4. VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS ASSOCIADOS À DAM NOS EFLUENTES DO CAPÃO DA ROÇA

Os gráficos relativos aos pontos de amostragem de efluente tratado (CR07) e efluente bruto (CR12), disponíveis da Figura 51 à Figura 71 apresentam uma evolução temporal dos principais parâmetros associados a DAM (Fe, Mn, Al, pH, sulfatos, condutividade e sólidos totais dissolvidos). Além disso, da mesma forma que os gráficos associados aos poços de monitoramento disponíveis no subitem anterior, os gráficos do presente subitem também discorrem dos valores da precipitação total mensal para avaliação da influência do fator climático junto aos resultados.

Ressalta-se que, para os casos dos parâmetros Fe total, Mn, Al e acidez do efluente tratado (CR07) e para o parâmetro pH do efluente bruto (CR12), os gráficos foram feitos duas vezes. Dessa maneira, para estes casos um dos gráficos apresenta todos os valores da série histórica, enquanto o outro apresenta a série histórica sem alguns valores interpretados como *outliers*. Contudo, é importante destacar que nem todos os valores interpretados como *outliers* foram retirados para a confecção dos gráficos secundários, mas somente aqueles que impedem, em função da escala do gráfico, a observação do padrão de evolução dos parâmetros em relação ao tempo e à precipitação total mensal.

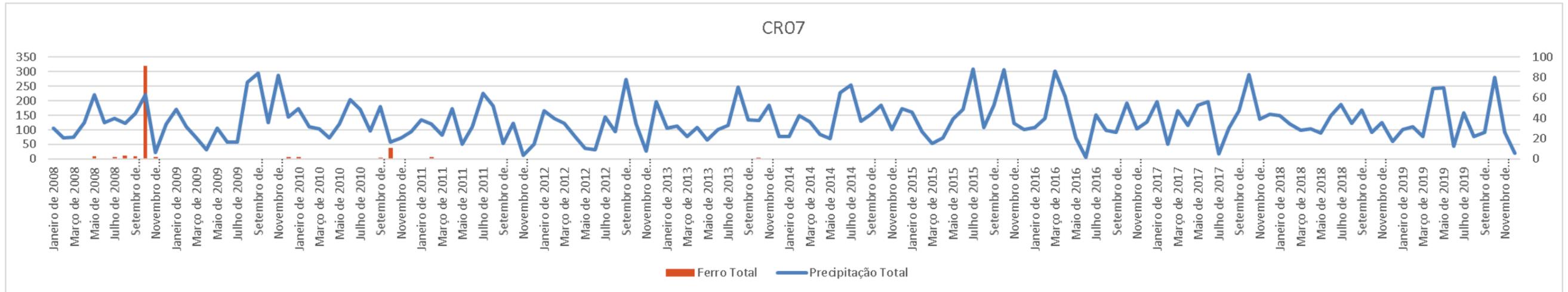


Figura 51. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe total realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

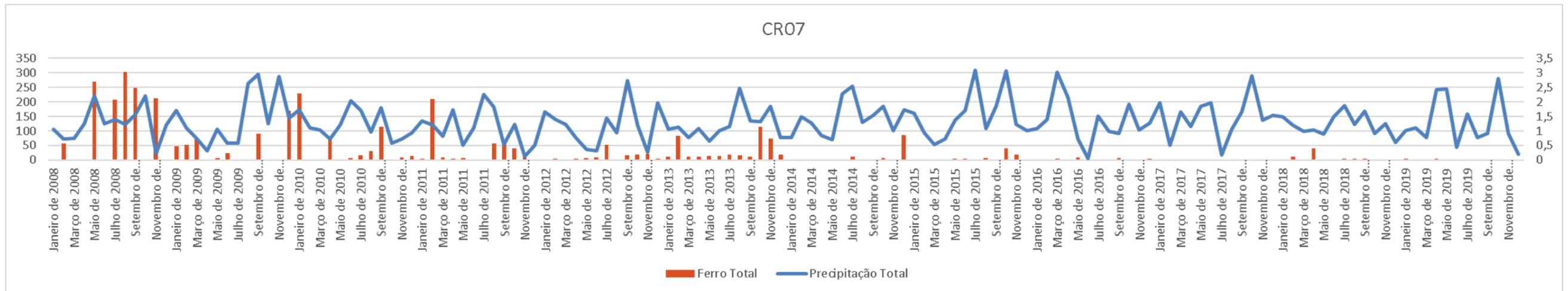


Figura 52. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe total realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os outliers (valores de outubro de 2008 e outubro de 2010, 91,5 mg/L e 10,9 mg/L, respectivamente) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

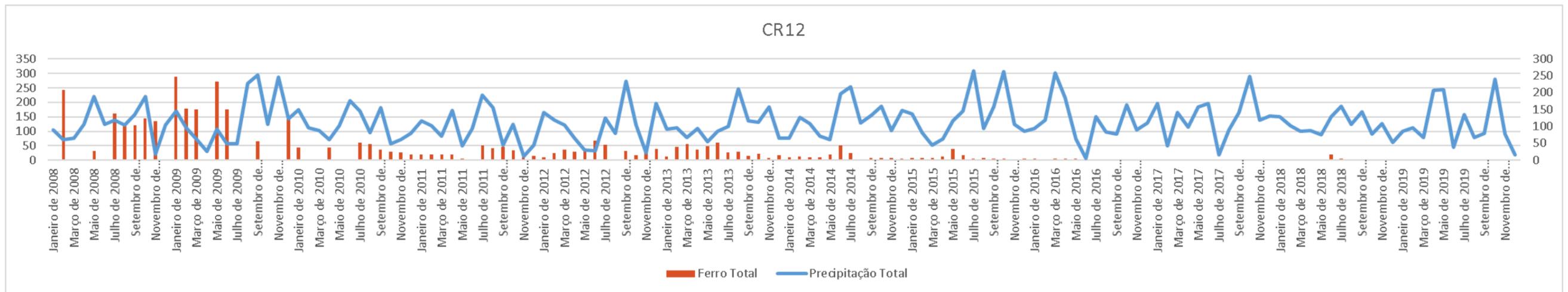


Figura 53. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Fe total realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

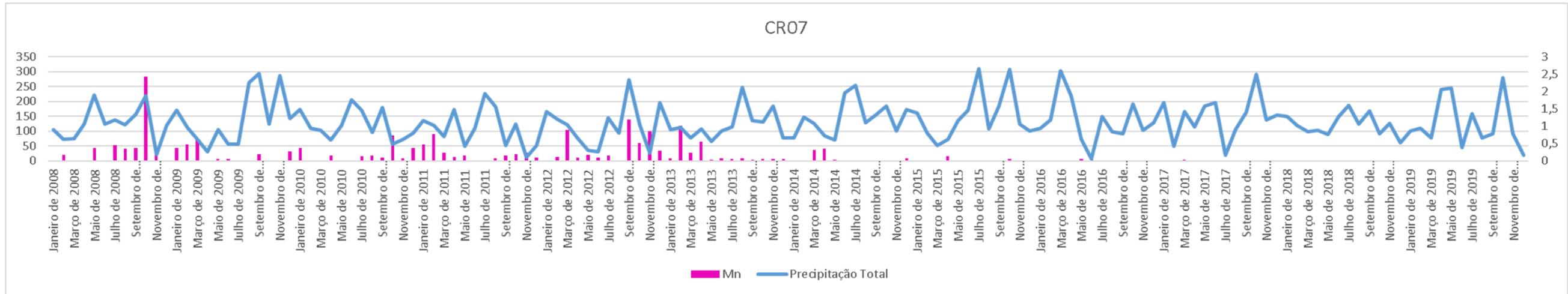


Figura 54. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

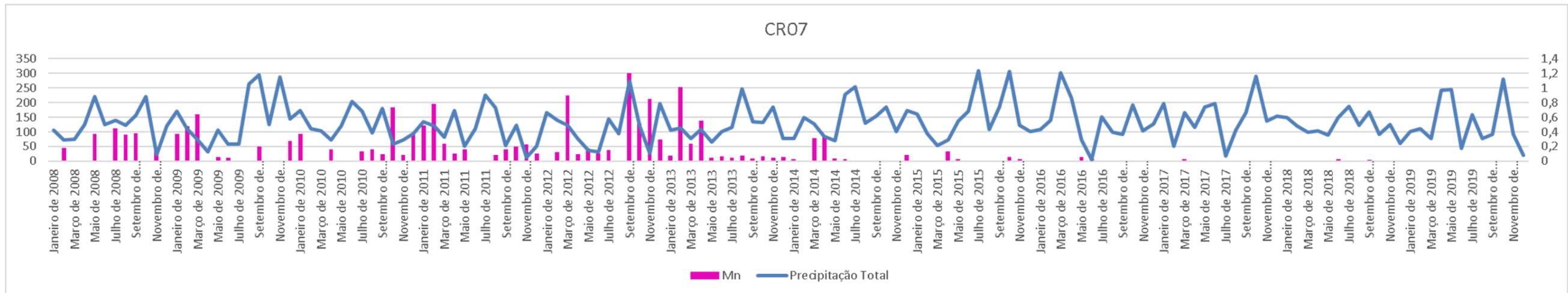


Figura 55. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os outliers (valor de outubro de 2008, de 2,42 mg/L) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

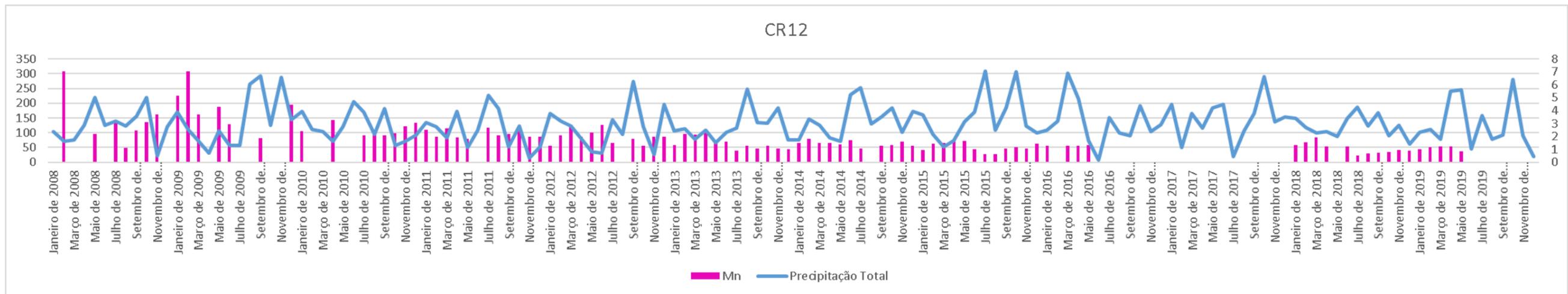


Figura 56. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Mn realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

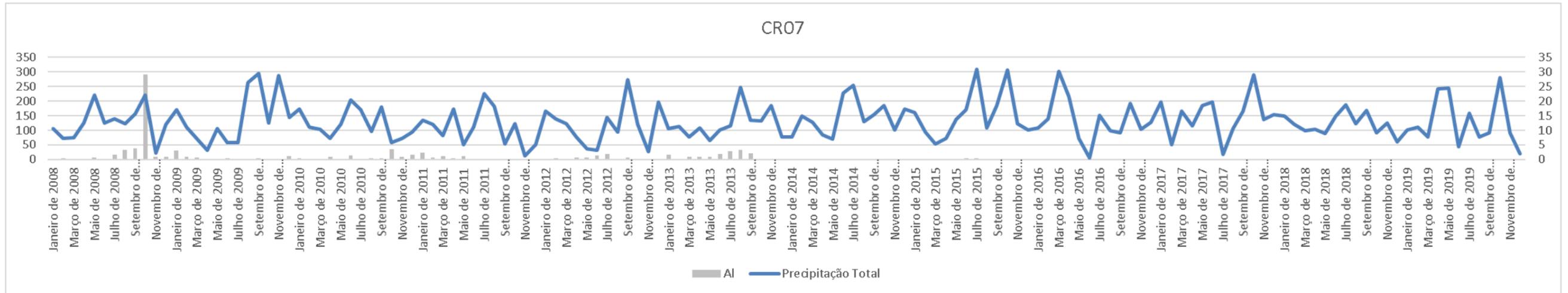


Figura 57. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

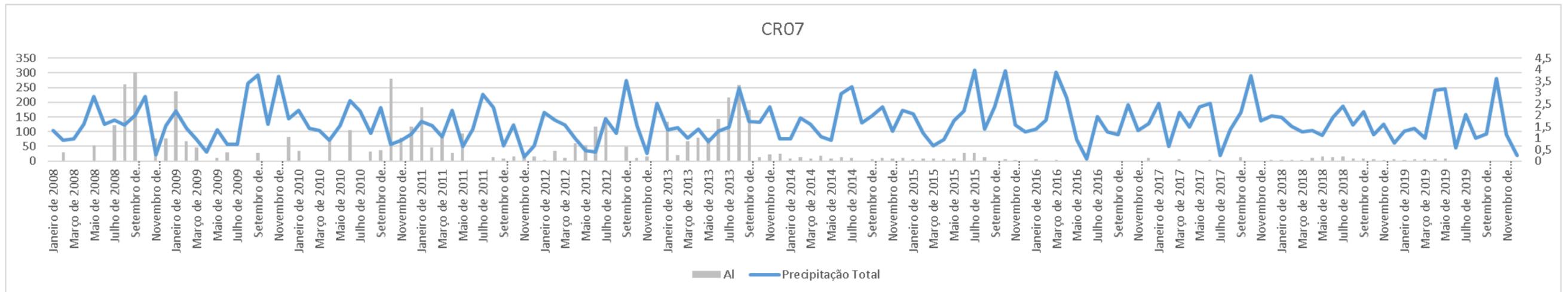


Figura 58. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os outliers (valor de outubro de 2008, de 2,42 mg/L) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

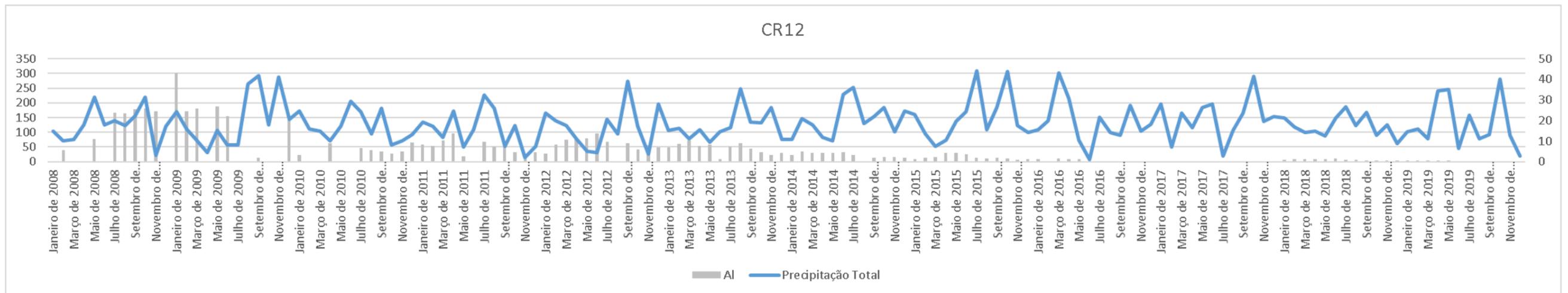


Figura 59. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de Al realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

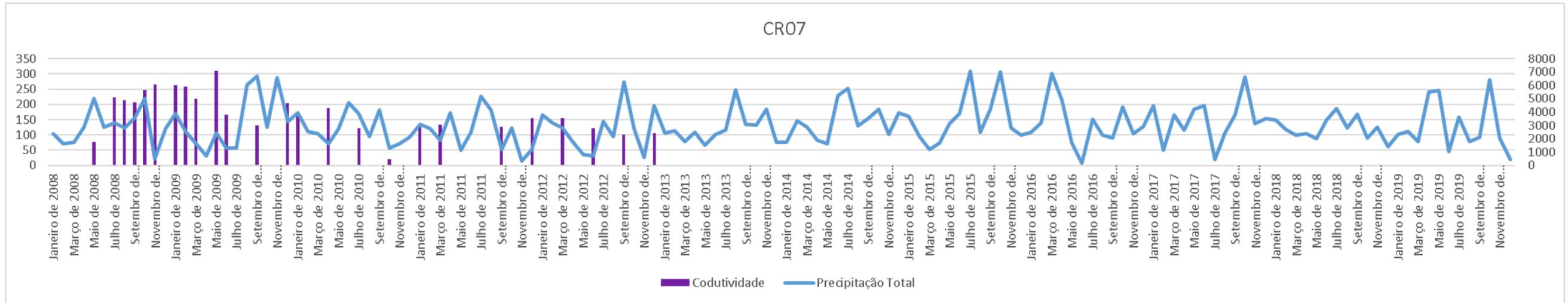


Figura 60. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.

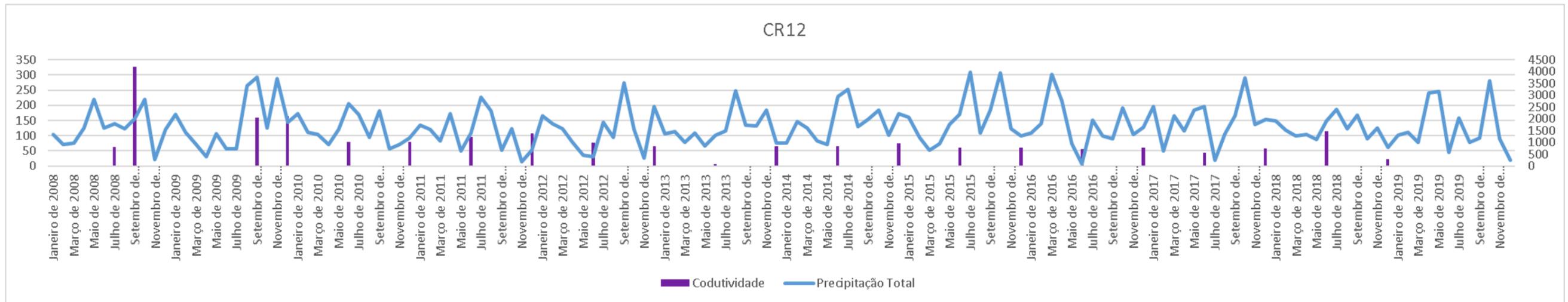


Figura 61. Gráfico com o resultado das medições de condutividade realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a condutividade em mS/cm.

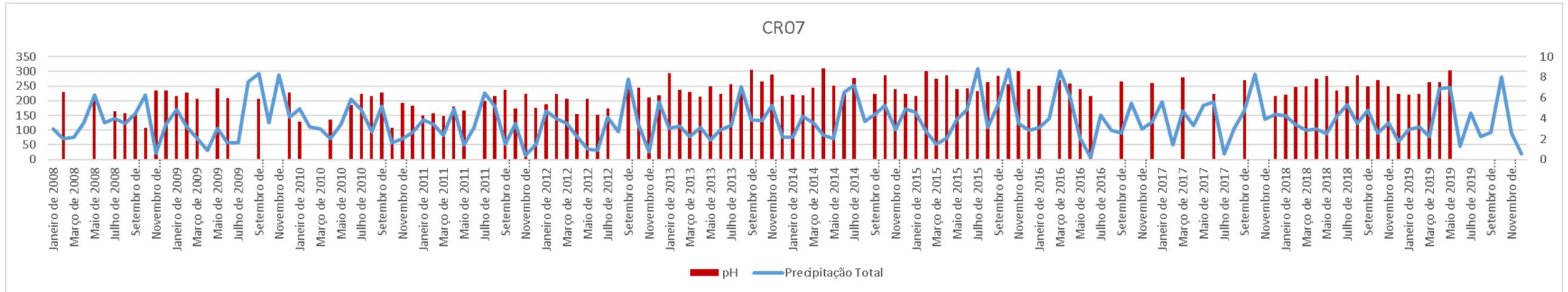


Figura 62. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.

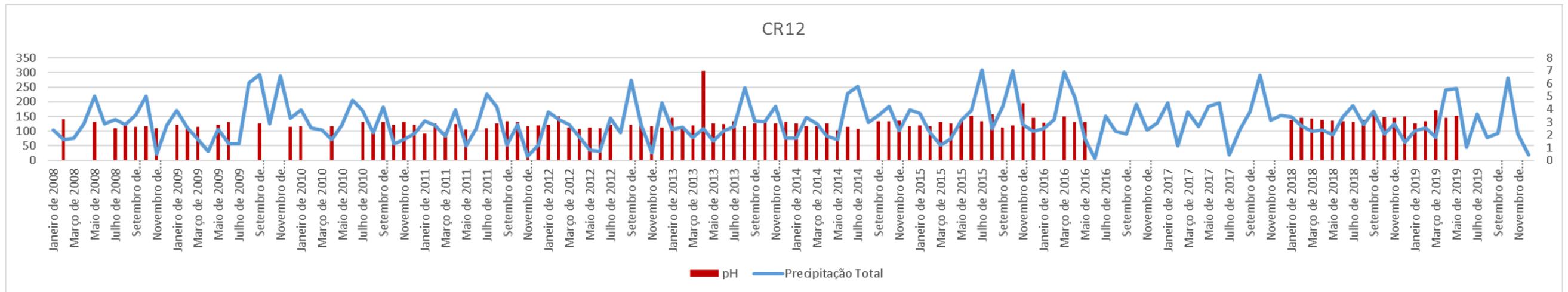


Figura 63. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando uma escala com valores de pH.

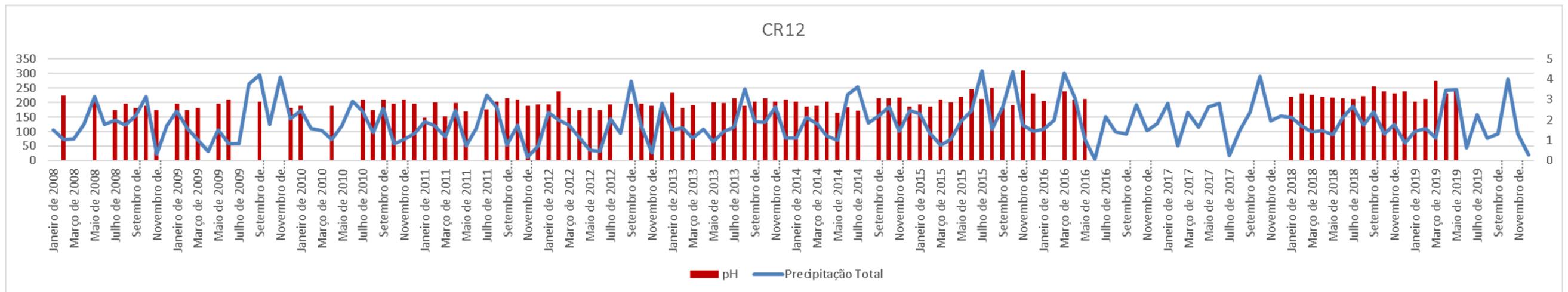


Figura 64. Gráfico com o resultado das medições de pH realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) retirados os outliers (valor de abril de 2013, de 6,98) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

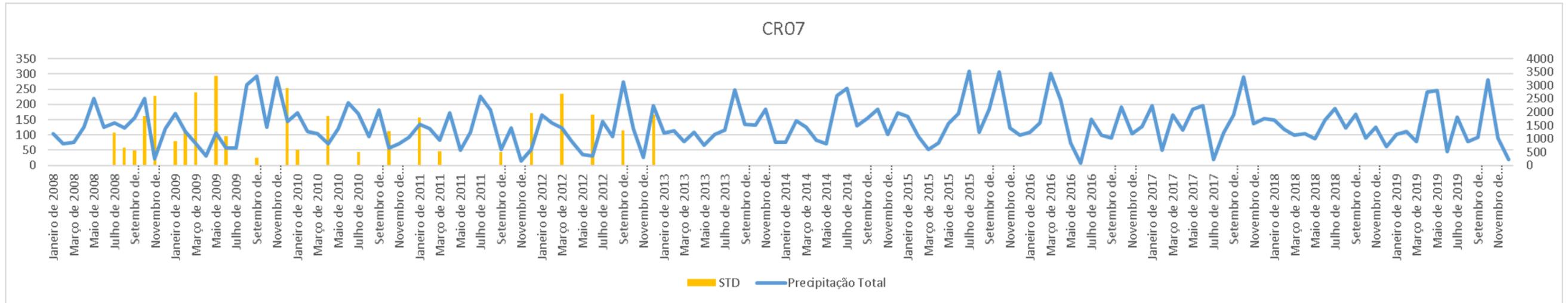


Figura 65. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sólidos totais dissolvidos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

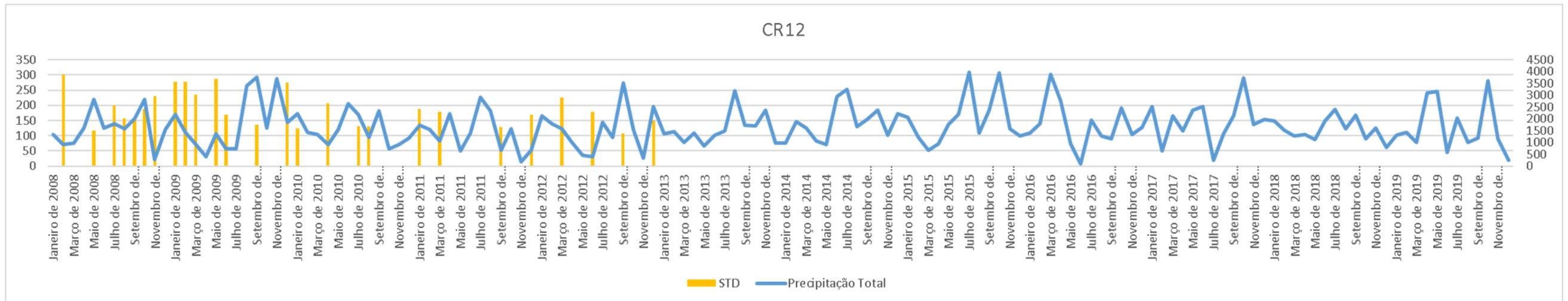


Figura 66. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sólidos totais dissolvidos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

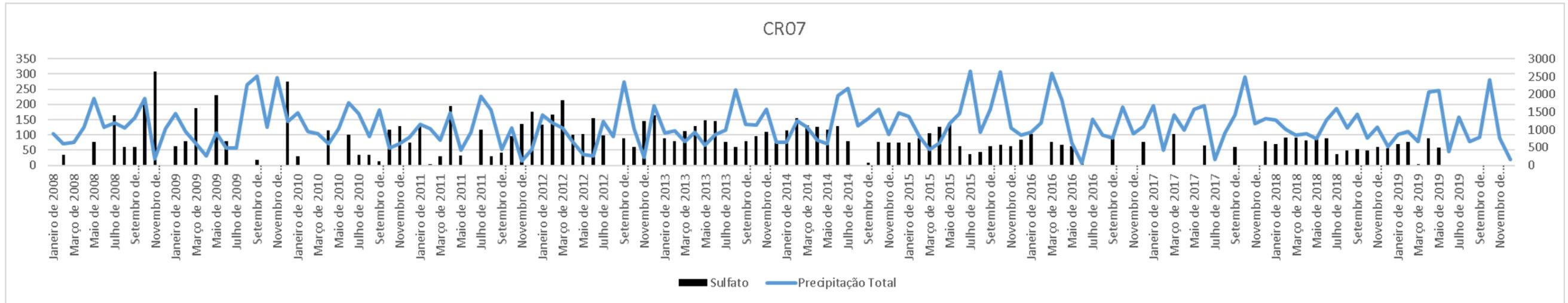


Figura 67. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

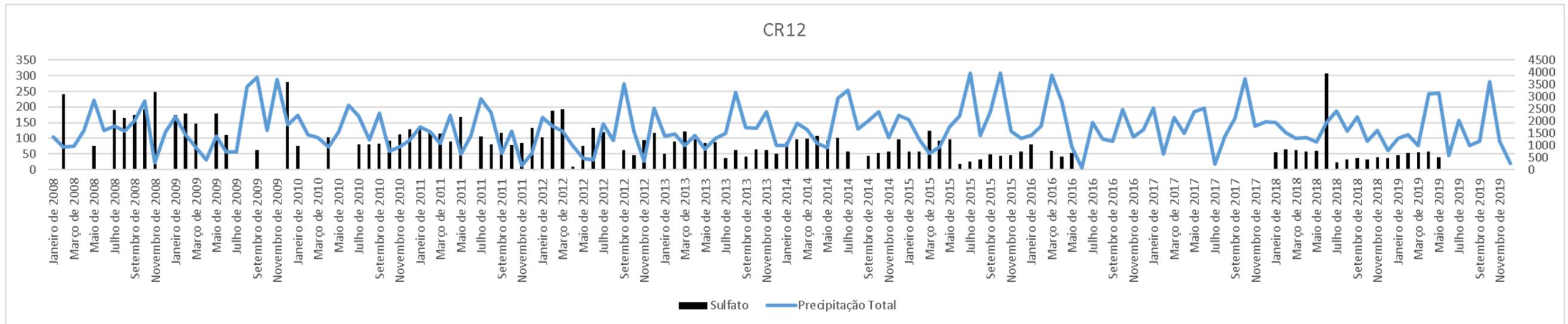


Figura 68. Gráfico com o resultado das medições de concentrações de sulfatos realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L.

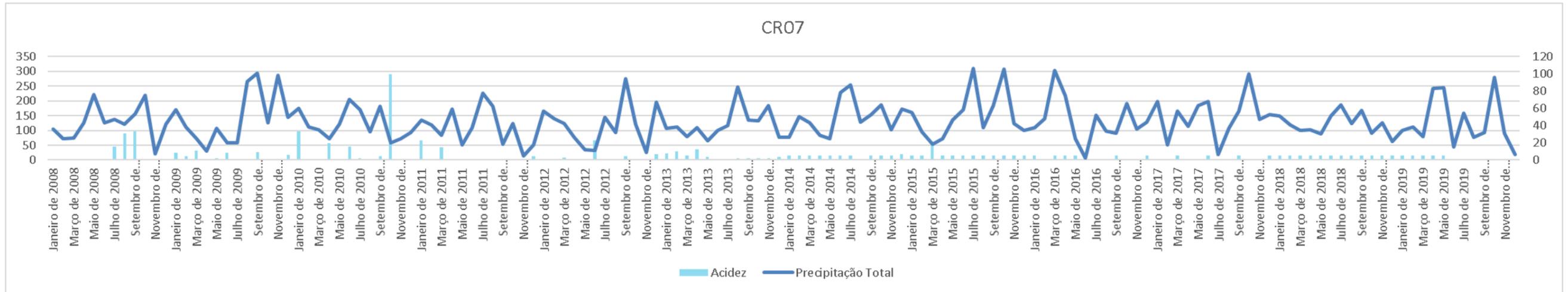


Figura 69. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃.

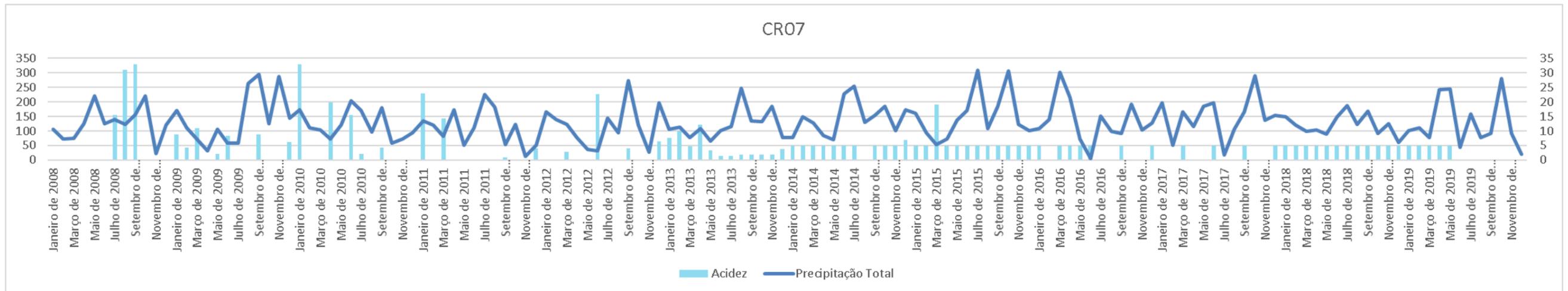


Figura 70. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente tratado (CR07) retirados os outliers (valor de outubro de 2010, de 502 mg/L CaCO₃) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃.

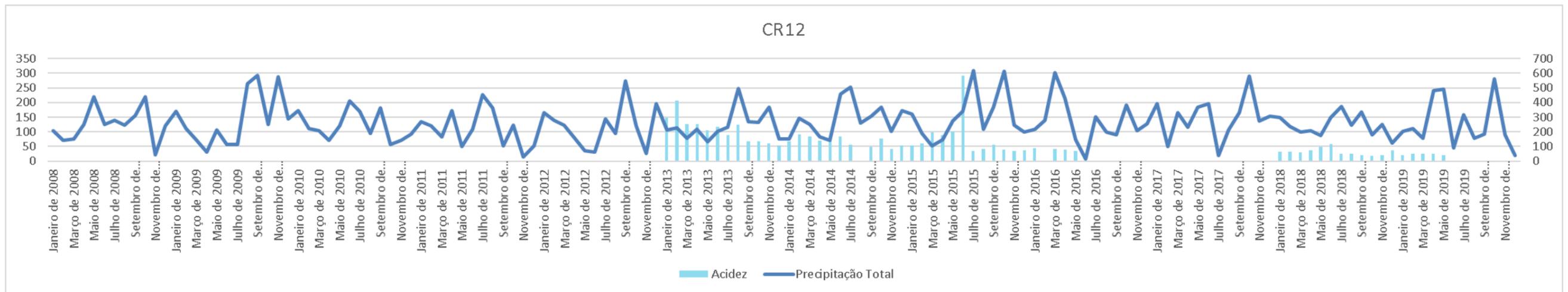


Figura 71. Gráfico com o resultado das medições de acidez realizadas no período janeiro de 2008 a dezembro de 2019 junto ao efluente bruto (CR12) e comparação com a precipitação total mensal da região no período com eixo à esquerda apresentando a precipitação em mm e eixo à direita apresentando a concentração em mg/L CaCO₃.

De maneira geral, o padrão observado tanto nos gráficos do efluente tratado (CR07) e do efluente bruto (CR12) se assemelham ao observado nas águas subterrâneas do poço CR03, disposto dentro do depósito de rejeitos em praticamente todos os parâmetros da série histórica, com aparente padrão de queda das concentrações na maioria dos parâmetros (em especial, o Fe e os Sulfatos) observados e da condutividade. Além disso, outra constatação genérica possível de ser feita é que, assim como os gráficos associados aos poços de águas subterrâneas, não há nenhuma aparente correlação entre a precipitação total mensal com a variação de qualquer um dos parâmetros avaliados.

Especificamente para os gráficos de sólidos totais dissolvidos e acidez, algumas circunstâncias impedem as constatações mais precisas já que os sólidos totais dissolvidos foram medidos apenas até dezembro de 2012, tanto para o efluente bruto quanto para o efluente tratado. Já no que se refere ao parâmetro acidez, a alteração do limite de quantificação, em função da alteração do método de medição, dificulta um melhor entendimento do atual estado, apesar de que ainda é possível afirmar que a mesma é mais baixa do que a média da acidez observada no início da série histórica.

O efluente tratado em geral foi o que apresentou maior variação e instabilidade na série histórica, quando comparado com o efluente bruto. Isso pode ser facilmente observado especialmente no parâmetro Fe com a comum ocorrência de valores abaixo de 0,5 mg/L intercalado com resultados até seis vezes de concentração. Esta variação é esperada haja vista que este material sofre influência do tratamento da ETE e, portanto, pode sofrer alterações conforme a operação da mesma.

A presença de *outliers* no efluente também pode estar tanto associado à operação, já que a maioria está associada ao efluente tratado, quanto ao grande volume amostral que naturalmente aumenta a possibilidade de erros de medição. Ainda no que se refere aos *outliers* também vale destacar a presença daqueles que não foram retirados por não atrapalhar a visualização em função da escala, mas que ainda podem ser interpretados como valor aberrante dentro da série histórica. Para estes casos destacam-se as medições de junho de 2018 do parâmetro sulfatos e de junho de 2015 do parâmetro acidez, ambos do efluente bruto. Para estes casos, a

medição pode ser considerada aberrante por destoarem das médias observadas nos meses imediatamente antecedentes e procedentes à análise.

4.5 CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS

A Tabela 12 apresenta os pontos de início e fim dos caminhamentos realizados em 2019, objeto do presente estudo, que estão dispostos em *datum* SIRGAS 2000 na zona UTM 22, enquanto as Tabela 19 e Tabela 20, disponíveis no Anexo 2 – Resultados dos caminhamentos elétricos - apresentam os valores de resistividade aparente observados junto ao resistivímetro nos caminhamentos 01 e 02, respectivamente. A Figura 72 mostra a disposição dos caminhamentos em relação ao depósito de rejeito e as linhas de Stevanato & Spinelli (2008).

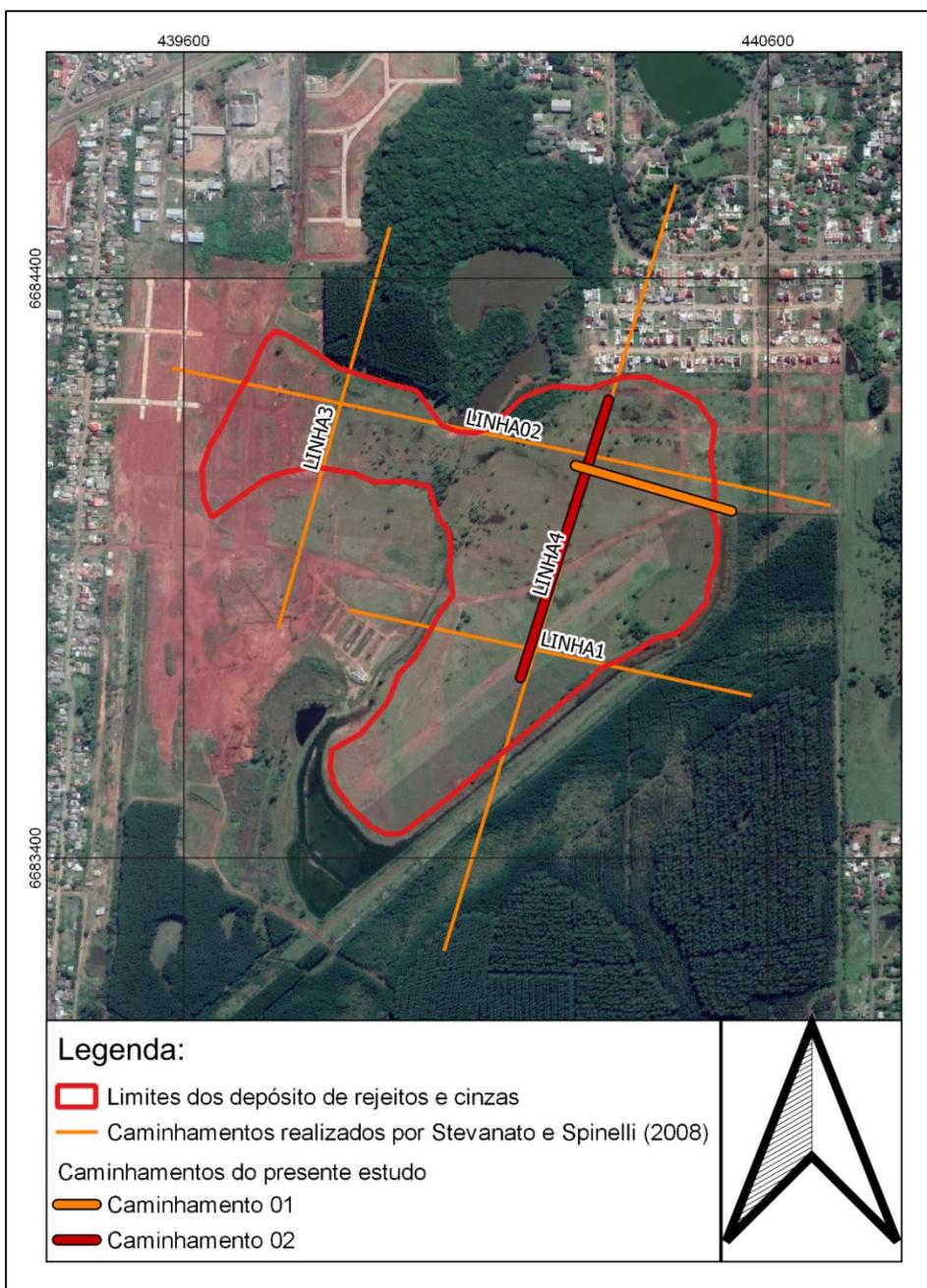


Figura 72. Caminhamentos realizados no presente estudo em 2019, em relação ao depósito de rejeitos e aos caminhamentos de Stevanato & Spinelli (2008).

Tabela 12. Posições iniciais e finais dos caminhamentos realizados pelo presente estudo em 2019, junto ao depósito de rejeitos e cinzas.

Posição do caminhamento	SIRGAS UTM 2000 – 22J	
	Metros Leste	Metros Norte
Início do Caminhamento 01	440537	6683998
Final do Caminhamento 01	440270	6684077
Início do Caminhamento 02	440327	6684190
Final do Caminhamento 02	440176	6683711

As pseudosseções resultantes da processamento dos dados dos caminhamentos elétricos realizados em 2019 podem ser observados nas Figura 73 à Figura 76.

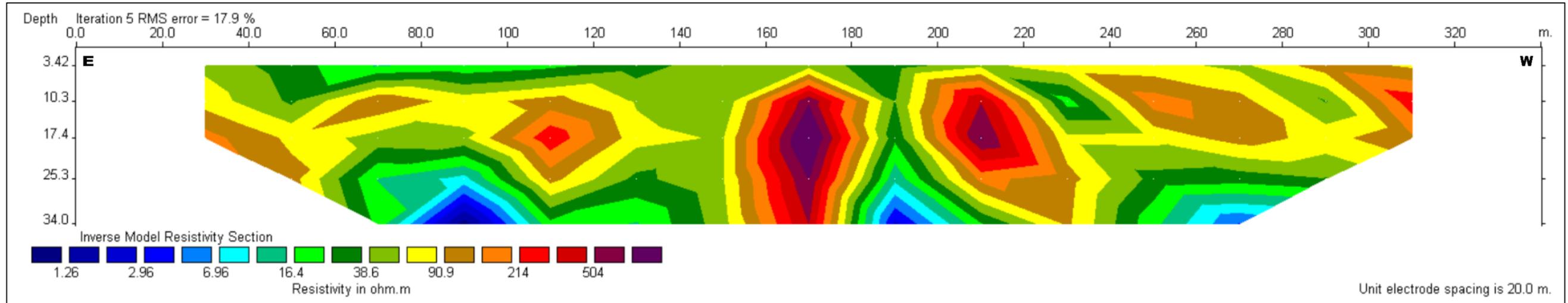


Figura 73. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 6 níveis de medição obtidos no Caminhamento 01, realizado em 2019 para o presente estudo.

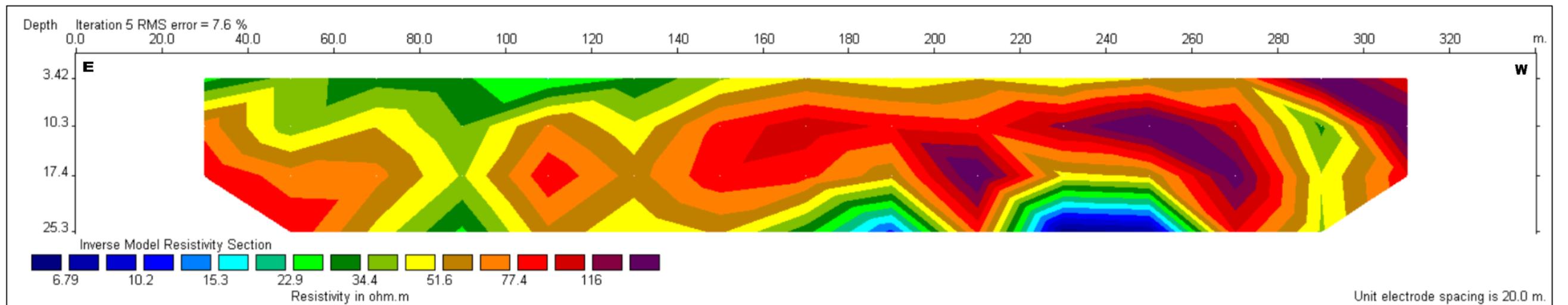


Figura 74. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 3 níveis de medição obtidos no Caminhamento 01, realizado em 2019 para o presente estudo.

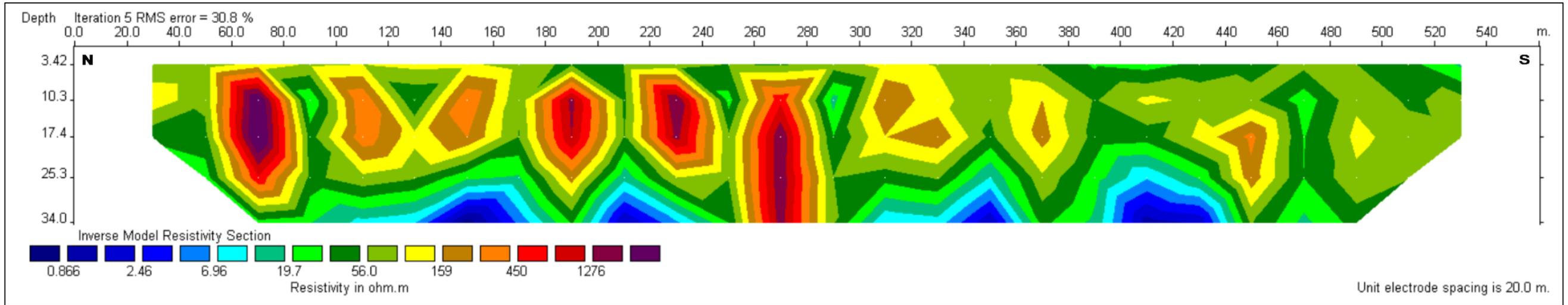


Figura 75. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 6 níveis de medição obtidos no Caminhamento 02, realizado em 2019 para o presente estudo.

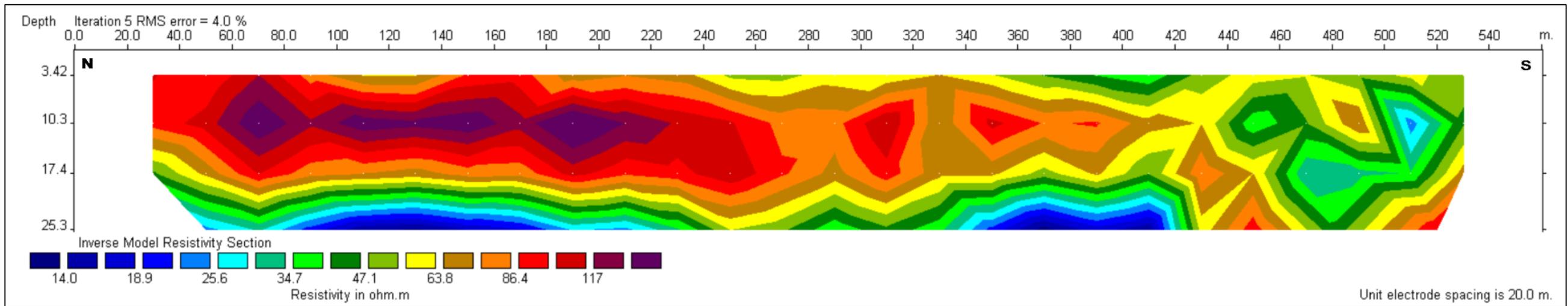


Figura 76. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados de resistividade aparente de 3 níveis de medição obtidos no Caminhamento 02, realizado em 2019 para o presente estudo.

Como resultado, o CE01 (Figura 73) em sua pseudosseção compilada com os seis níveis, o mesmo apresentou uma seção no formato de meio trapézio que se dispõe ao longo de 280 metros de extensão e 34 m de profundidade. Em geral, a maior parte do substrato analisada apresenta uma resistividade de 13 a 90 ohm.m. Contudo, também é possível observar a presença de corpos de alto resistivos verticalizados entre os marcadores de distâncias de 150 e 190 e 190 e 225 e um segundo corpo, entre 240 e 340 m. Ambos os corpos apresentam uma alta resistividade, por vezes ultrapassando 504 ohm.m. Ressalta-se também a queda da resistividade a medida que a profundidade vai aumentando, onde são observados valores de resistividade abaixo de 2 ohm.m, na porção basal, ligados a alteração do substrato.

A compilação junto ao *software* dos dados obtidos junto aos primeiros 3 níveis do CE01 resultou em uma pseudosseção de 25,3 metros de profundidade (Figura 74). Esta dispõe de isocurvas de resistividade real com um padrão mais horizontalizado com a condutividade comumente oscilando entre 23 e 116 ohm.m. Neste caso, chama-se a atenção a inexistência dos corpos de alta resistividade em formato verticalizado como aqueles observados quando foi realizada a iterações de todos os seis níveis do CE01

O CE02 quando processado com 6 níveis de dados obtidos (Figura 75) apresentou uma maior resistividade comumente entre 15 ohm.m e 150 ohm.m. Além disso, da mesma forma que o CE01, tal caminhamento elétrico apresenta um padrão de corpos verticalizados ainda mais resistivos que aqueles observados no CE01 (quando compilados os seis níveis), neste caso apresentando resistividade, acima de 1276 ohm.m. Também é possível observar a maior ocorrência de corpos de baixo resistivos a partir de 25 metros de profundidade, ligados a alterações do substrato.

O CE02, quando analisado apenas nos seus três primeiros níveis (Figura 76), apontam uma disposição ainda mais horizontal das isocurvas de resistividade real com uma maior resistividade observada no início do caminhamento (a noroeste) e uma menor resistividade observada no final do caminhamento.

No que se refere ao erro, os caminhamentos CE01 e CE02 apresentaram valores aceitáveis (entre 0% e 10% conforme manual do *software* Res2Dinv vers 3.59) quando compilados apenas os dados dos três primeiros níveis com valores de 7,6%

e 4%. Contudo, para as análises geoestatísticas realizadas com os dados dos seis níveis, foi observado erros altos de 17,9% e 30,8%, respectivamente.

Para uma comparação com os caminhamentos antigos realizados por Stevanatto e Spinelli (2009), foi feito uso dos dados de resistividade aparente colhidos junto às linhas 02 e 04 para os trechos que coincidem com os caminhamentos atualmente realizados. Ressalta-se que para um melhor entendimento do leitos os caminhamentos realizados no presente estudo em 2019 continuarão a ser denominados CE01 e CE02 enquanto os caminhamentos realizados por Stevanatto e Spinelli 2008 serão referidos como linhas, L02 e L04.

Para linha 02 realizado por Intergeo (Stevanatto e Spinelli, 2008) foram utilizados os dados de 140 m e 460 m da linha 02 de forma a corresponder ao CE01 realizado em 2019. Para a linha 04 realizada por Intergeo (Stevanatto e Spinelli, 2008) CE02 foram utilizados os trechos de 400 e 920 m da linha 4 (Figura 77).

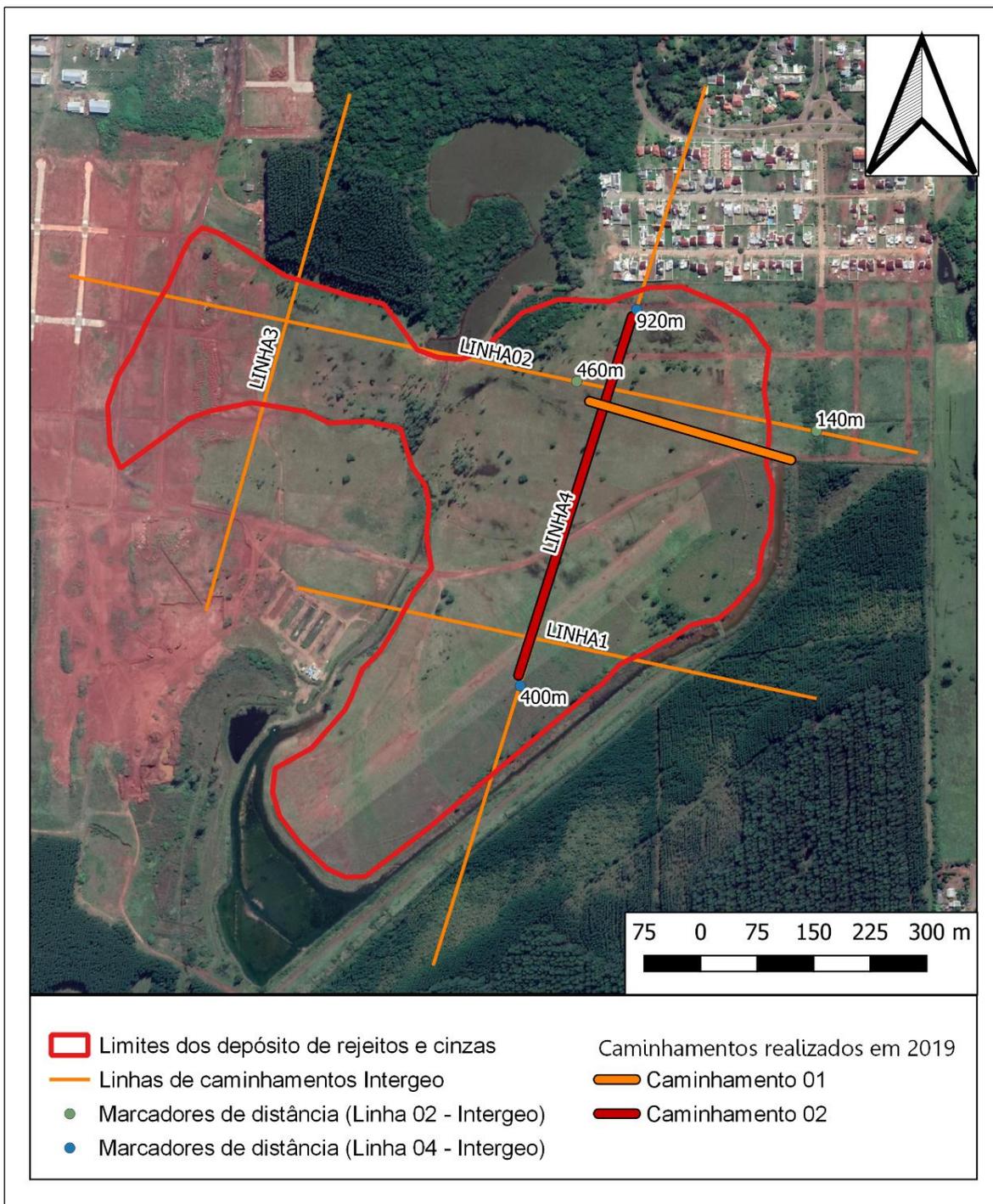


Figura 77. Correlação entre os CEs 01 e 02 realizados em 2019, para o presente estudo, em relação às linhas de caminhamentos de Intergeo (Stevanatto e Spinelli, 2008) e os marcadores de distâncias das Linhas 02 e 04 que delimitam os trechos a serem comparados com os caminhamentos recentes

Estes dados correspondentes aos trechos 140 m a 460 m da Linha 02 e 400 m a 920 m da Linha 04 realizados por Intergeo foram então lançados junto ao *software* Res2Dinv vers 3.56, mesmo *software* utilizado para a compilação dos dados do caminhamentos realizados no presente trabalho, para que ambos fossem submetidos

ao mesmo tipo de processamento de dados, conforme comentado na metodologia Item 3.3 ETAPA PÓS-CAMPO.

As pseudosseções resultantes da compilação dos dados dos trechos 140 m a 460 m da Linha 02 e 400 m a 920 m da Linha 04 – realizados por Intergeo – podem ser observados nas Figura 78, Figura 79, Figura 80 e Figura 81.

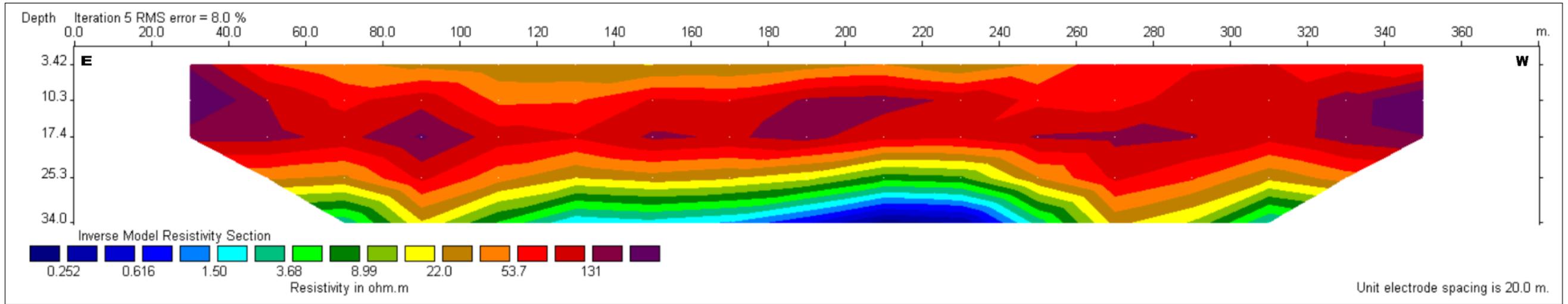


Figura 78. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 6 níveis de medição entre às distâncias de 140 m a 460 m da Linha 02 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao software Res2Dinv vers 3.56.

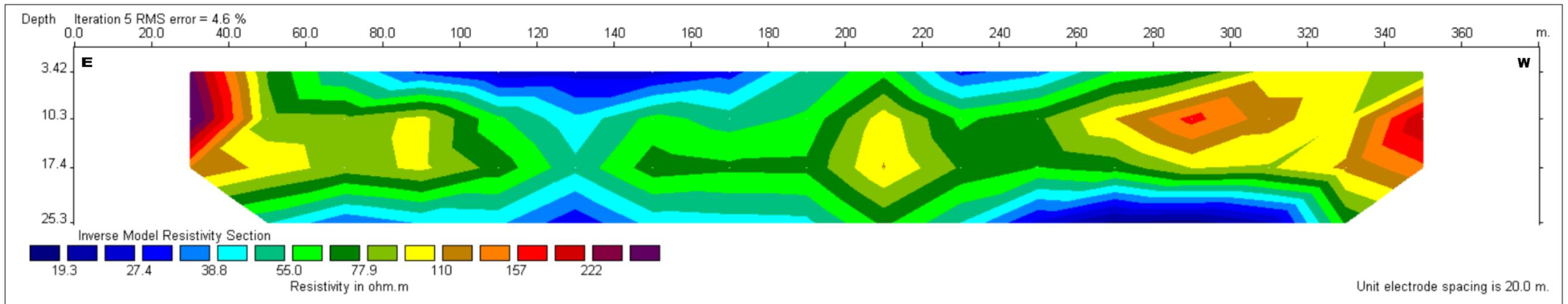


Figura 79. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 3 primeiros níveis de medição entre às distâncias de 140 m a 460 m da Linha 02 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao software Res2Dinv vers 3.56.

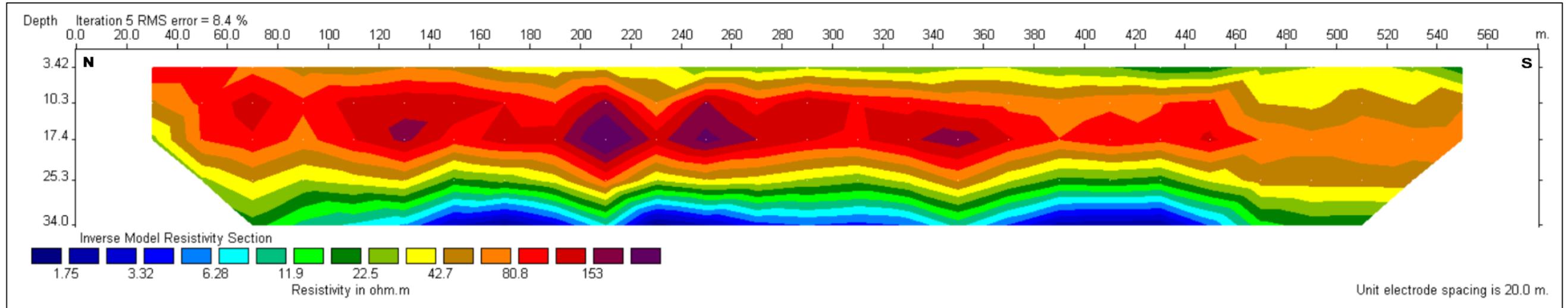


Figura 80. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 6 níveis de medição entre às distâncias de 400 m a 920 m da Linha 04 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao software Res2Dinv vers 3.56.

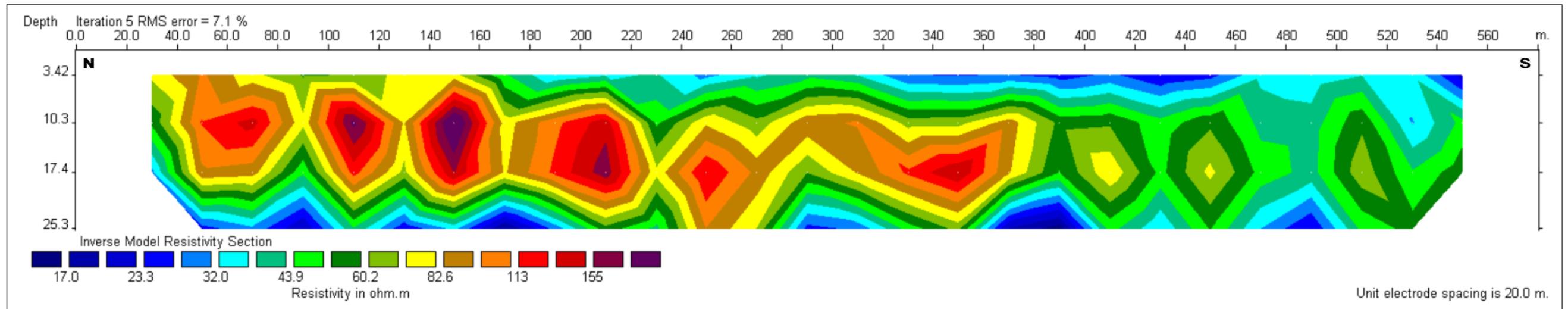


Figura 81. Pseudosseção resultante da interpolação dos dados coletados nos 3 primeiros níveis de medição entre às distâncias de 400 m a 920 m da Linha 04 do trabalho de Stevanatto e Spinelli (2008) junto ao software Res2Dinv vers 3.56.

A pseudosseção resultante do processamento dos dados da L02 de Stevanatto e Spinelli (2008) (Figura 78) apontou que Figura 78 o substrato na porção avaliada apresenta até 25 metros de profundidade uma resistividade entre 20 e 130 ohm.m à época dos caminhamentos. Abaixo desta profundidade foram observados resultados inferiores a 1 ohm.m até 20 ohm.m. Em geral, o substrato apresenta uma menor variação da resistividade na direção horizontal de forma que as maiores variações de tal propriedade ocorrem na medida que a profundidade varia. Este padrão não foi quebrado no processamento dos dados em três níveis (Figura 79), que continuou demonstrando isocurvas horizontalizadas.

A pseudosseção resultante do processamento dos dados correlatos a L04 de Stevanatto e Spinelli (2008), disponível na Figura 80 apresenta, na iteração de todos os seis níveis, um padrão de distribuição da resistividade também relativamente homogêneo no que se refere à variação lateral com as maiores variações ocorrendo na direção vertical. Contudo, diferentemente da L02, o processamento dos dados dos três primeiros níveis da mesma seção não reiterou a homogeneidade lateral observada no processamento com os seis níveis demonstrando pequenas porções do substrato com resistividade relativamente maior do que outras porções dispostas na mesma profundidade.

No que se refere ao erro, todos os processamentos realizados para os caminhamento L02 e L04 apresentaram valores abaixo de 10%. No processamento de seis níveis, o erro calculado foi de 8% e 8,4% para os caminhamentos L02 e L04, respectivamente, enquanto no processamento de três níveis o erro foi um pouco menor, com 4,6% e 7,1%, respectivamente.

De forma a avaliar mais quantitativamente as pseudosseções confeccionadas no presente estudo, foi realizado o cálculo de resistividade média de cada uma das pseudesseções. Para a realização deste cálculo, fez-se necessária a classificação das cores que indicam as isocurvas de resistividade de A a Q conforme a Figura 82, a seguir.



Figura 82. Classificação das isocurvas de resistividade dos caminhamentos elétricos disponíveis nas Figura 73 à Figura 76 e Figura 78 à Figura 81.

Após a classificação, foi realizada a vetorização dos caminhamentos e o cálculo da porcentagem da área que cada uma das isocurvas ocupa na pseudosseção. Tal vetorização foi feita à mão livre em um software de GIS.

Em seguida, foi calculada a resistividade que cada uma destas isocurvas representa para cada um dos caminhamentos disponíveis nas Figura 73 à Figura 76 e Figura 78 à Figura 81. Conforme pode ser observado nos caminhamentos da isocurva denominadas B até a isocurva denominada P o *software* atribui um valor de resistividade intermediária a cada duas cores. Assim, o valor atribuído para as isocurvas B a O serão a média ponderada entre os valores da série. Já para a isocurva A, o valor atribuído foi o menor número de resistividade apresentado na interpolação. Por fim, as isocurvas P e Q tem como valor de resistividade atribuída à maior resistividade observada no processamento.

Após estas etapas foi realizado o cálculo de resistividade média da pseudosseção estimada a partir do somatório do produto entre a porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção com a resistividade atribuída à isocurva. A resistividade média de cada pseudosseção bem como a porcentagem de área que cada isocurva ocupa nas pseudosseções e o valor de resistividade de cada isocurva podem ser observados nas Tabela 13 à Tabela 16 para os respectivos caminhamentos.

Tabela 13. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico CE01 realizado em 2019 para o presente estudo.

Caminhamento	Isocurva de resistividade	Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção	Resistividade atribuída à isocurva (ohm.m)	Média da resistividade do caminhamento
CE01 3 níveis	A	0,134	6,79	65,378
	B	0,254	7,926667	
	C	0,343	9,063333	
	D	0,383	11,9	
	E	0,575	13,6	
	F	0,738	17,83333	
	G	0,869	20,36667	
	H	2,057	26,73333	
	I	5,116	30,56667	
	J	9,819	40,13333	
	K	14,868	45,86667	
	L	18,288	60,2	
	M	17,840	68,8	
	N	14,451	90,26667	
	O	6,725	103,1333	
	P	4,121	116	
Q	3,420	116		
CE01 6 níveis	A	0,020	1,260	100,600
	B	0,134	1,827	
	C	0,276	2,393	
	D	0,555	4,293	
	E	1,043	5,627	
	F	1,765	10,107	
	G	3,217	13,253	
	H	6,568	23,800	
	I	11,117	31,200	
	J	23,050	56,033	
	K	22,048	73,467	
	L	15,029	131,933	
	M	6,260	172,967	
	N	3,757	310,667	
	O	2,676	407,333	
	P	1,755	504,000	
Q	0,732	504,000		

Tabela 14. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico CE02 realizado em 2019 para o presente estudo.

Caminhamento	Isocurva de resistividade	Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção	Resistividade atribuída à isocurva (ohm.m)	Média da resistividade do caminhamento
CE02 3 níveis	A	0,068	14	69,777
	B	0,344	15,63333	
	C	0,856	17,26667	
	D	1,163	21,13333	
	E	1,442	23,36667	
	F	2,518	28,63333	
	G	3,694	31,66667	
	H	5,948	38,83333	
	I	7,666	42,96667	
	J	10,147	52,6	
	K	12,417	58,1	
	L	12,924	71,2	
	M	12,695	78,8	
	N	10,918	96,6	
	O	9,203	106,8	
	P	5,759	117	
Q	2,237	117		
CE02 6 níveis	A	0,013	0,866	160,164
	B	0,187	1,397	
	C	1,082	1,929	
	D	0,978	3,960	
	E	1,800	5,460	
	F	2,941	11,207	
	G	4,007	15,453	
	H	8,566	31,800	
	I	18,801	43,900	
	J	26,524	90,333	
	K	15,029	124,667	
	L	8,392	256,000	
	M	4,669	353,000	
	N	2,870	725,333	
	O	2,266	1000,667	
	P	1,407	1276,000	
Q	0,468	1276,000		

Tabela 15. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico L02 realizado em 2008 por Setevanatto e Spinelli.

Caminhamento	Isocurva de resistividade	Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção	Resistividade atribuída à isocurva (ohm.m)	Média da resistividade do caminhamento
L02 3 níveis	A	0,133	19,3	72,708
	B	0,593	22	
	C	1,484	24,7	
	D	3,160	31,2	
	E	5,198	35	
	F	9,481	44,2	
	G	13,442	49,6	
	H	18,117	62,63333	
	I	14,739	70,26667	
	J	13,008	88,6	
	K	10,695	99,3	
	L	4,775	125,6667	
	M	2,685	141,3333	
	N	1,191	178,6667	
	O	0,613	200,3333	
	P	0,353	222	
Q	0,332	222		
L02 6 níveis	A	0,096	0,252	69,388
	B	0,280	0,373333	
	C	0,561	0,494667	
	D	0,645	0,910667	
	E	0,852	1,205333	
	F	1,533	2,226667	
	G	1,957	2,953333	
	H	2,574	5,45	
	I	2,927	7,22	
	J	3,738	13,32667	
	K	4,925	17,66333	
	L	9,031	32,56667	
	M	12,802	43,13333	
	N	19,211	79,46667	
	O	27,523	105,2333	
	P	9,582	131	
Q	1,764	131		

Tabela 16. Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção, resistividade atribuída à isocurva (ohm.m) e média da resistividade calculada para o caminhamento elétrico L02 realizado em 2008 por Setevanatto e Spinelli.

Caminhamento	Isocurva de resistividade	Porcentagem da área que a isocurva ocupa na pseudosseção	Resistividade atribuída à isocurva (ohm.m)	Média da resistividade do caminhamento
L04 3 níveis	A	0,020	17	67,341
	B	0,207	19,06667	
	C	0,441	21,13333	
	D	1,594	26,03333	
	E	3,673	28,86667	
	F	7,589	35,53333	
	G	10,954	39,36667	
	H	12,173	48,46667	
	I	12,354	53,73333	
	J	11,069	66,16667	
	K	11,453	73,33333	
	L	10,402	90,33333	
	M	8,532	100,1667	
	N	5,302	123,3333	
	O	2,811	136,6667	
	P	1,152	150	
Q	0,271	150		
L04 6 níveis	A	0,020	1,800	62,998
	B	0,573	2,330	
	C	0,950	2,860	
	D	1,611	4,387	
	E	2,207	5,383	
	F	2,838	8,253	
	G	3,124	10,127	
	H	3,689	15,500	
	I	4,516	19,000	
	J	6,987	29,133	
	K	12,620	35,767	
	L	14,904	54,833	
	M	15,697	67,267	
	N	15,810	103,133	
	O	10,579	126,567	
	P	3,161	150,000	
Q	0,713	150,000		

Conforme pode ser observado das Tabela 13 à Tabela 16, uma das principais diferenças observadas entre os caminhamentos CE01 e CE02 e os L02 e L04 de Stevanatto e Spinelli (2008) é a grande discrepância das resistividades médias estimadas para o substrato quando os dados são tratados em seis níveis. Nestes casos, o substrato sob o CE01 e CE02 apresentam uma resistividade média de 100,6 ohm.m e 160,164 ohm.m, expressivamente maiores que os valores de 69,388 e 62,998, obtidos junto à L02 e L04, respectivamente. Estes altos valores são visivelmente influenciados pelos corpos de altos resistivos resultantes do processamento do CE01 e CE02 que, em geral, apresentam-se anômalos dentro do contexto e tendem a elevar a média.

Outro fator a se destacar é a semelhança entre as resistividades obtidas no processamento em três níveis dos caminhamentos CE01 e CE02, 65,378 ohm.m e 69,777 ohm.m, respectivamente, com seus respectivos pares L02 e L04 que apresentam resistividades de 72,708 ohm.m e 67,341 ohm.m. Por fim, destaca-se o fato da compilação em três níveis dos caminhamentos L02 e L04 apresentarem uma resistividade maior que sua compilação em seis níveis.

5 DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E DE EFLUENTES

Antes de qualquer análise associada à contaminação é importante pontuar alguns aspectos no que diz respeito ao poço CR03 (Figura 15), que por se tratar do poço instalado junto ao depósito é a principal fonte de informações associadas à contaminação das águas subterrâneas. Conforme comentado anteriormente no item 2.5.1 Caracterização dos rejeitos do depósito do Capão da Roça, toda a área que engloba o depósito possui um substrato majoritariamente formado por sedimentos inconsolidados de planície aluvionar e um lençol freático próximo à superfície que, por vezes, satura o rejeito. Esta saturação ocorre na posição do poço CR03 em determinados períodos de elevação do nível d'água uma vez que o nível estático de 3,64 m de profundidade medido em junho de 2020 por Copelmi (2020) ocorre muito próximo à base do rejeito que ocorre a 3,5 m de profundidade (Figura 15). Ademais, os registros de Binotto (1997) mostram o NA de alguns poços acima da base do depósito de rejeitos, o que revela a interferência do mesmo na posição da zona saturada do local (Figura 5).

Além disso, é importante pontuar também que os dados observados não representam a contaminação de uma porção ou camada específica da área filtrada, mas sim da mistura das águas de toda a seção filtrante. Neste contexto, é possível que, por exemplo, não haja contaminação efetiva pelo processo natural de advecção até profundidade de 8,8 m, início da camada de areia média a grossa (Figura 14), porém devido à captação da água subterrânea próxima à superfície pode-se cometer um erro de interpretação devido à mistura da água destes níveis. Também é importante destacar que o fato do nível estático ocorrer mais próximo a superfície torna provável a observação de elevados níveis de contaminação junto ao poço, uma vez que a saturação do rejeito facilita o transporte dos contaminantes para a seção filtrante

De todo modo, é importante pontuar que a contaminação por DAM nas águas subterrâneas, sob o depósito de rejeitos do Capão da Roça, é observada em todos os parâmetros analisados no poço CR03, desde as altas concentrações de Fe, Al, Mn, sulfatos e na alta acidez e condutividade (Figura 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47 e 50). Apesar da limitação de haver apenas um poço instalado em todo o depósito, tal constatação é ratificada pelos resultados das análises físicas, químicas e físico-

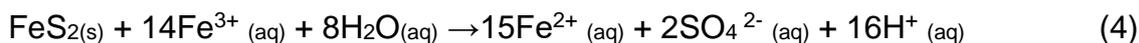
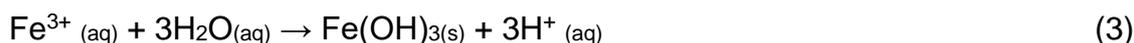
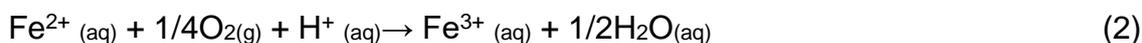
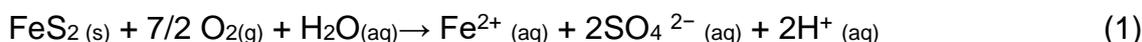
químicas dos efluentes que também demonstram altas concentrações dos mesmos parâmetros associados à DAM, além de alta condutividade e acidez (Figura 51 à Figura 71).

Uma das constatações mais relevantes que se pode observar a partir da compilação dos dados de águas subterrâneas no presente trabalho é o padrão de queda similar na maioria dos gráficos correlatos ao poço CR03 (Figura 29, 32, 35, 38, 41, 44, 46 e 50). De maneira geral, em todos os gráficos associados a esse poço e aos efluentes, há uma visível tendência de queda da contaminação como por exemplo, nas concentrações de sulfato que apresentam valores como 2387 mg/L e 1726 mg/L nos dois primeiros anos do início da série histórica e finalizam os últimos dois anos da mesma série com valores entre 229 mg/L e 301 mg/L.

No que se refere à queda das concentrações dos parâmetros Fe, Al, sulfatos e STD no poço CR03 e nos efluentes (Figura 29, 35, 44, 47, 52, 53, 58, 59 e Figura 65 à Figura 68) observa-se um padrão de queda relativamente homogênea, mas acentuada. Já o Mn apresentou um padrão de queda de concentrações menos expressivo e menos homogêneo ao longo do tempo (Figura 32 e Figura 54 à Figura 56). Outro parâmetro que apresentou uma queda menos expressiva para o poço CR03 e para o efluente bruto foi a condutividade elétrica (Figura 38, 60 e 61) e a acidez (Figura 50, 69, 70 e 71) que, no caso do pH (Figura 41 e Figura 64), não apresentou uma tendência ao neutro, à exceção, do efluente tratado. Em geral esta tendência ao neutro seria esperada, uma vez que a concentração dos principais parâmetros associados à DAM tiveram forte queda.

A partir destes apontamentos, é importante destacar que a queda mais acentuada do Fe em relação ao Mn contrasta com as conclusões do trabalho de Binotto (1997). Este contraste se dá especialmente no sentido de que, segundo a caracterização do rejeito realizada pela autora analisando diversos metais (Cd, Co, Cu, Pb, Ni, Mn, Cr, Fe e Zn), o Mn seria o elemento mais móvel enquanto o Fe seria aquele com menor mobilidade observada. Segundo a conclusão da autora, as altas concentrações de Fe nas águas subterrâneas se davam principalmente em função das altas concentrações do mesmo associados à abundância de pirita junto ao rejeito e não em função de sua mobilidade.

Uma das possíveis constatações no que se refere à relativamente baixa quantidade de Fe observada recentemente pode estar relacionada à precipitação de hidróxido de Ferro. Conforme comentado no item 2.4. CONTAMINAÇÃO POR REJEITO DE CARVÃO E CINZAS DE CARVÃO, para cada um mol de pirita (FeS_2) oxidado é liberado um mol de Fe^{2+} (aq) e dois mols de SO_4^{2-} (aq). Em seguida, o Fe^{2+} , quando em meio ácido, oxida dando origem ao Fe^{3+} que por sua vez precipita na forma de hidróxido de Fe (III) [$\text{Fe}(\text{OH})_3$]. Em geral, o processo supracitado ocorre da equação 1 à equação 3 propostas por Singer & Stumm (1970) dispostas a seguir



A eventual ocorrência da reação associada à equação 3, responsável pela precipitação de (hidróxido de Fe [III]) além de explicar a baixa proporção de Fe_{tot} em relação às altas concentrações de sulfatos e a maior queda do Fe em relação Mn, ainda explicam o fato do pH não tender ao neutro, uma vez que a reação de hidrólise tende a liberar H^+ para o meio. Desta maneira, ainda que as concentrações de sulfatos tenham caído consideravelmente como observados nas Figura 46, 67 e 68, o pH ainda tende a se manter estável. Ressalta-se que, neste caso, o processo associado à equação 4 provavelmente tem um efeito irrisório uma vez que a oxidação do ambiente não é suficiente para produzir um volume expressivo de Fe^{3+} para que a reação ocorra.

De maneira geral, no que se refere aos resultados das análises do poço CR03 e dos efluentes, há de se destacar uma das questões mais relevantes observadas no presente estudo que é a própria existência de uma queda bastante significativa da contaminação. Em geral, é consenso na literatura que a contaminação associada à DAM apresente quedas mais acentuadas em uma escala de tempo de, pelo menos, alguns milhares de anos (Filho, 1997). Neste contexto, a diminuição da contaminação,

principalmente marcada pela queda de sulfatos, dentro do depósito de rejeitos do Capão da Roça em um período de aproximadamente 10 anos (evidenciado pela queda das concentrações dos parâmetros observados no presente estudo) pode ser considerada uma anomalia.

No que se refere às análises de águas subterrâneas obtidas junto aos poços localizados a montante (CR01) e a jusante (CR02), constata-se atualmente a inexistência de contaminação imediatamente a jusante da porção sul do depósito de rejeitos (CR02) até uma profundidade efetiva de 12 metros onde está localizada a base da secção filtrante do poço de monitoramento CR02. Esta afirmação ocorre, tanto pelos níveis relativamente bem inferiores de diversos parâmetros associados à DAM dentro do depósito, quanto em função da não observação de padrões semelhantes entre os gráficos de evolução temporal dos contaminantes no aquífero. Sob esta ótica, cabe ressaltar também o padrão similar dos poços CR01 (montante) e CR02 (jusante) em diversos parâmetros, tais como o Al e a condutividade, onde diversos episódios de pico ocorrem na mesma época.

Em geral, a maior diferença entre os poços CR01 e CR02 está no grau de acidez nas águas subterrâneas de ambos, de tal forma que em geral, as águas do CR01 apresentam uma acidez levemente maior em relação ao CR02.

Além disso, a similaridade entre alguns parâmetros como a condutividade elétrica, Fe e Al em diversos períodos também evidencia uma possível sazonalidade. Esta sazonalidade não pode ser explicada unicamente pela precipitação total mensal, conforme foi possível observar junto aos gráficos de evolução temporal dos parâmetros associados à DAM. De maneira geral, em nenhum parâmetro dos efluentes e águas subterrâneas, foi possível observar uma correlação clara entre a precipitação total mensal e os parâmetros observados.

5.2 CAMINHAMENTOS ELÉTRICOS

Conforme abordado no item 3.2.1 Eletroresistividade e caminhamentos elétricos, um dos principais fatores associados à interpretação dos resultados dos caminhamentos elétricos é a geologia da área. Para o caso do presente estudo, a geologia da área tem seu embasamento na literatura tanto indiretamente, na forma de mapas, como nas descrições dos perfis dos poços de monitoramento existentes na área. Segundo a descrição dos poços de monitoramento de Binotto (1997) e nos poços atuais (disponíveis no Capítulo 2.6), de maneira geral, a camada de rejeito de carvão pode ser observada junto ao substrato entre 80 cm e 4 m de profundidade. Esta é seguida de uma camada argilo-arenosa fina de espessura que varia de 1 a 2 m de espessura e que, por sua vez encontra-se sobreposta a uma última camada efetivamente conhecida de conglomerados de matriz que varia de areia à argila e cuja profundidade da base é desconhecida. O poço mais profundo dentro do depósito de rejeitos (CR03) possui 12 m de comprimento e intercepta esta camada.

Dado o pouco conhecimento sobre a geologia do substrato em grandes profundidades e o fato de o método em questão ser considerado um método indireto de avaliação, é importante afirmar a dificuldade de uma avaliação pontual uma vez que a própria geologia do depósito comumente apresenta uma grande variação de resistividade em função da alternância de camadas de areia e argila. Dessa maneira, ressalta-se que é imprudente a afirmação da existência de contaminação única e exclusivamente em função da baixa resistividade em função do baixo volume de dados relativos a geologia local.

Com relação à contaminação e sua correlação com a resistividade do meio, conforme abordado no item anterior 5.1, a queda na contaminação foi marcada pela queda na concentração de diversos parâmetros como o Fe, Mn, Al, STD e, especialmente, o sulfato. Esta diminuição da contaminação resultou em uma relativamente pequena queda de condutividade (Figura 38, Figura 60 e Figura 61), que em geral tende a ser registrada nos caminhamentos elétricos.

Outro fator de grande relevância a se pontuar é o tipo de contaminação que ocorre junto ao aquífero. Por se tratar de uma contaminação por DAM, onde, de forma genérica a contaminação se dá em fase dissolvida, conclui-se que, naturalmente, a forma de transporte mais relevante dos contaminantes são a advecção a dispersão mecânica e a dispersão hidrodinâmica. Isso porque apesar de tanto a advecção

quanto à difusão transportarem íons dissolvidos, o transporte por difusão é restrito a curtíssimas distâncias.

Neste contexto, as pseudosseções de seis níveis que atingiram 34 m de profundidade têm como principal objetivo apresentar eventuais diferenças de resistividade aparente ocasionada pelo uso de diferentes aparelhos entre as campanhas de 2008 realizadas por Stevanatto e Spinelli e a atual campanha. Além disso, por disporem de um maior volume de dados, as pseudosseções de seis níveis são importantes por apresentar uma melhor resolução em relação as seções de três níveis.

Conforme já comentado, há uma significativa diferença entre as resistividades médias observadas nos caminhamentos realizados em 2019 e aqueles realizados em 2008, quando processados os dados de todos os seis níveis medidos. Contudo, estes altos valores são fortemente influenciados pelos corpos de altos resistivos com padrão vertical que apresentam resistividades desde 200 ohm.m até 1.000 ohm.m. Este padrão não aponta necessariamente para a contaminação, já que a mesma, conforme comentado, ocorre majoritariamente na forma dissolvida e dificilmente assumiriam um padrão verticalizado. Além disso, para um padrão associado à contaminação é esperada a observação de corpos de baixa resistividade, ou seja, mais condutivos em função da maior concentração de íons dissolvidos na água subterrânea.

Dessa maneira, uma das possibilidades para os altos resistivos observados seria a variação do substrato. Outra possibilidade seria de erros pontuais de medição que durante o processamento tendem a gerar fortes alterações. Essa possibilidade é reforçada a partir do alto erro observado nos caminhamentos CE01 e CE02 (Figura 73 e Figura 75). Assim, tendo em vista, a forte influência destes corpos anômalos de CE01 e CE02 que, ou não estão associados à contaminação, ou operam como *outliers*, é inoportuna uma avaliação mais quantitativa no que se refere à comparação entre os caminhamentos anteriores e os caminhamentos atuais quando processados todos os seis níveis.

Contudo, excluindo-se os corpos anômalos de CE01 e CE02 uma das principais conclusões possíveis a partir dos caminhamentos CE01, CE02, L02 e L04 quando processados todos os seis níveis (Figura 73, Figura 75, Figura 78 e Figura 80) é uma provável alteração litológica entre, aproximadamente 23 e 27 metros, marcada pelo relativamente mais baixo padrão resistivo quando comparados ao material sotoposto, apresentando, por vezes, valores abaixo de 1 ohm.m em diversos caminhamentos.

Já no que se refere ao processamento dos três primeiros níveis dos caminhamentos atuais CE01 e CE02 e caminhamentos antigos L02 e L04 (Figura 74, Figura 76, Figura 79 e Figura 81) é possível observar padrões bem mais homogêneos e concordantes com erros de processamento expressivamente menores. Estes erros baixos estão possivelmente associados ao menor volume de dados, quanto em função dos eventuais erros de medição constarem entre os níveis 4 e 6.

O baixo erro e o padrão coerente (sem corpos verticalizados) tendem a validar os resultados deste processamento em três níveis, em especial para os caminhamentos CE01 e CE02. Além disso, no que se refere às pseudosseções de seis níveis, apesar de imprópria para análises quantitativas, ainda são bons instrumentos para análises qualitativas de variações do substrato, na busca de padrões mais evidentes.

Um exemplo destes padrões observados é a mais alta condutividade observada à norte do caminhamento CE02 que também é observada em L04, seu caminhamento correspondente. Este padrão é esperado uma vez que a migração dos contaminantes ocorreria para sul, conforme o mapa potenciométrico elaborado por Binotto (1997). Neste cenário, conforme as pseudosseções, os contaminantes estariam atingindo grandes profundidades, até aproximadamente 20 m e, migrando para sul.

Contudo, conforme é possível observar em todos os caminhamentos, de maneira geral há a ocorrência de um aumento de resistividade entre os primeiros metros de profundidade e a porção que corresponde a profundidade de 10 m. A explicação mais plausível para este fenômeno seria que a menor resistividade observada nos primeiros metros de profundidade do substrato estaria representando a contaminação mais intensa do substrato. Neste cenário, a contaminação estaria alcançando médias profundidades (entre 10 e 20 m) de forma restrita e pontual com pouca mobilidade nestes casos. Assim, a expressiva maioria dos contaminantes estaria migrando na primeira dezena de metros de profundidade.

Em geral, este segundo cenário com contaminantes sendo transportados de forma mais expressiva nos primeiros metros é o mais plausível. Isso se dá especialmente em função da constatação de Binotto (1997) que classificou o aquífero que ocorre junto ao depósito de rejeitos como um aquífero livre com rápida migração de contaminantes.

Já no que se refere aos dados quantitativos das pseudosseções, a média estimada para os caminhamentos quando processados em três níveis são possivelmente o fator

mais relevante. No que se refere ao caminhamento CE01 e seu caminhamento análogo espacialmente (L02), ambos expressaram uma relativamente alta diferença com valores respectivamente de 65,378 ohm.m e 72,708 ohm.m, o que representaria uma queda de 10,08% na resistividade. Contudo, quando observados os valores de erros de ambos os caminhamentos, tem-se que CE01 e L02 apresentam, respectivamente, 7,6% e 4,6%, o que deixaria a variação observada dentro de uma margem de erro.

Da mesma forma, quando comparada a resistividade média dos caminhamentos CE02 e L04, observam-se respectivamente os valores de 69,777 e 67,341. Isso representaria um aumento de 3,49%, abaixo de ambos os valores de erros observados.

6 CONCLUSÕES

Os dados de monitoramento da contaminação, no presente trabalho, apontaram a queda da contaminação do rejeito do depósito na área do Capão da Roça, no Município de Charqueadas. Isto pode estar se refletindo nas águas subterrâneas junto às camadas abaixo do rejeito. Os principais marcadores da contaminação atualmente são os sulfatos, o Mn e o Al. O Fe, ainda que um marcador, tende a não refletir de forma confiável o grau de contaminação das águas, uma vez que o mesmo tem se precipitado na forma de hidróxido de Fe (III).

A condutividade apresentou queda ao longo do período de monitoramento. Em função disso, havia a expectativa de que isso se refletisse em uma análise quantitativa na comparação entre os caminhamentos novos e antigos. Entretanto, essa alteração quantitativa não foi efetivamente observada nos caminhamentos quando processados em três níveis em função dos valores obtidos estarem abaixo do erro estimado. Já no que se refere ao processamento em seis níveis, esta alteração quantitativa também não foi observada. Porém, neste caso, isto ocorreu, em função das pseudoseções terem apresentado, em determinados pontos, algumas incongruências (possivelmente ocasionadas por *outliers*), que distorceram algumas porções dos caminhamentos. Contudo, seus padrões se mantiveram coerentes com os caminhamentos realizados por Stevanatto e Spinelli (2009).

A análise conjunta dos dados de monitoramento e dos caminhamentos elétricos possibilitaram a elaboração de três cenários para o estágio atual de contaminação das águas subterrâneas da área do Capão da Roça, na área englobada pelos caminhamentos:

1. A contaminação do substrato em médias profundidades (10 a 20 metros), ultrapassando os 10 metros de profundidade observada nos caminhamentos pela diminuição da resistividade de norte para sul no caminhamento CE02;
2. A contaminação do substrato apenas nos primeiros metros abaixo do substrato com a subsequente migração do mesmo para sul antes que os contaminantes consigam atingir médias profundidades;

3. A não contaminação efetiva do substrato localizado imediatamente abaixo do rejeito e a constatação de contaminação apenas observada pela proximidade da secção filtrante com a base do rejeito.

Destaca-se contudo que a hipótese mais provável levantada é a 2, em função dos seguintes fatores:

- Caráter livre do aquífero nos primeiros metros de profundidade que indica um aquífero condutivo;
- A não observação de contaminação no poço CR02;
- A existência de uma camada de sedimentos conglomeráticos com matriz argilosa que diminui a possibilidade de infiltrações de contaminantes;
- A queda de condutividade do primeiro nível para o segundo nos caminhamentos em toda a área que engloba o depósito indicando uma contaminação apenas nas primeiras dezenas de metros.
- A não observação de uma queda na resistividade média na comparação entre os caminhamentos anteriores e novos, quando processados em três níveis.

Um melhor entendimento da contaminação das camadas sotopostas ao rejeito disposto poderão ser tiradas a partir da instalação de novos poços de monitoramento com secções filtrantes dispostas em diferentes profundidades. Isso auxiliará no monitoramento da dispersão dos contaminantes em subsuperfície complementando o processo de remediação que vem se mostrando efetivo, conforme os dados de análises de águas subterrâneas e efluentes no depósito.

Já no que se refere à utilização do método da eletrorresistividade junto ao depósito como forma de medir a intensidade da contaminação, uma possibilidade seria o monitoramento por SEV em pontos específicos georreferenciados. Esta seria uma forma indireta simples de medir a intensidade da contaminação por tratar-se de um método relativamente acessível sob o ponto de vista financeiro, uma vez que a realização de SEVs é mais rápida e de menor custo em relação a caminhamentos elétricos.

7 REFERÊNCIAS

- ABCM, 2016. Associação Brasileira de Carvão Mineral. Carvão Mineral – Dados Estatísticos – Ano: 2016.
- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AZAMBUJA, E.; COSTA, A. F. U.; NANNI, A. S. 1999. O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos. In: 4º Con. Bras. de Geotecnia Ambiental. São José dos Campos. p. 119-126. 1999;
- BECK, Hylke E. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, v. 5, p. 180214, 2018.
- BINOTTO, Raquel Barros. 1997. Avaliação do grau de contaminação das águas subterrâneas em áreas de influência de resíduos do processamento do carvão. 1997. Dissertação de mestrado em engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais – PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.
- BORTOLIN, José Ricardo Melges. Monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP) por meio do método da eletrorresistividade. 2009. 134 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2009. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/92750>>.
- BRAGA, A. C. O. 2007. Métodos Geométricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas. Material didático de Geofísica Aplicada do curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, Rio Claro (SP), 2007;
- CAZZULO-KEPZIG, M., GUERRA-SOMMER, M., MENEGAT, R., SIMAS, M. W. E MENDONÇA-FILHO, J. G. 2007. Peat-forming environment and landscape unit of Permian coal seams from the Faxinal coalfield in Southern Paraná Basin, Brazil, based on palynology and palaeobotany. *Revista Brasileira de Paleontologia* v.10(2), p, 5–15. 2007;
- COPELMI MINERAÇÃO LTDA. 1994. Estudo Ambiental da Mina de Charqueadas. Porto Alegre, volumes I. 1994;
- COPELMI MINERAÇÃO LTDA. 2020. Primeiro Relatório De Monitoramento Semestral do Depósito de Rejeitos e Cinzas de Carvão do Capão da Roça. Porto Alegre. 2020;
- CORRÊA DA SILVA, Z.C. 1987. Jazidas de carvão no Rio Grande do Sul, Brasil. In: III Simp. Sul-Bras. Geol. Anais...Curitiba, v.2, p.677-687. 1987;
- COSTA, Antônio Flávio Uberti et al. Caracterização da pluma poluidora gerada pelo depósito municipal de lixo da zona norte de Porto Alegre-RS. 1994.
- FILHO, J. M. Contaminação das águas subterrâneas. In: Feitosa, F. A. C. ; Filho, J. M. (Coord.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Recife: CPRM/LABHID-UFPE.1997.cap. 6, p. 109-130.

FÚLFARO, V. J.; GAMA JR, E.; SOARES, P. C. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. São Paulo: Paulipetro, 1980.

GALLAS, José Domingos Faraco et al. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n. 1, p. 51-59, 2005.

GEOTOMO SOFTWARE. RES2DINV ver. 3.56 for Windows 98/Me/2000/NT/XP: User's Manual. Penang, Malasya: Geotomo Software, 2007.

GOMES, Aramis Pereira, et al. 1998. Carvão fóssil. Estudos avançados 12 (33), 1998, p. 89-106. 1988;

GOOGLE. Google Earth website: <http://mapas.google.com>. Consulta realizada em. 08/02/2019

KEAREY, P.; BROOKS; M. AND HILL, I. 2009. Geofísica de exploração. São Paulo: Oficina de Textos, p.315-317. 2009.

KELLER, George Vernon; FRISCHKNECHT, Frank C. Electrical methods in geophysical prospecting. 1966.

MELLO, J. W. V.; DUARTE, H. A.; LADEIRA, A. C. Q. 2014. Origem e Controle do Fenômeno Drenagem Ácida de Mina. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, n. 8, p. 24-29, 2014;

MENDES, Josué Camargo. Elementos de estratigrafia. 1992.

MILANI, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado. 1997;

MILANI, E. J.; FACCINI, U. F.; SCHERER, C. M. S.; ARAÚJO, L. M.; CUPERTINO, J. A. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. Boletim IG-USP (Série Científica, n. 29), São Paulo, p. 125-173. nov. 1998;

MILANI, E. J.; MELLO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. 2007. Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás. v.15(2) p. 265-287, 2007;

MOURA, H. P. ; MALAGUTTI FILHO, W. 2007. Métodos da eletrorresistividade e da polarização induzida aplicados no estudo do aterro controlado de Piracicaba-SP. Geociências (São Paulo), v. 26, p. 35-43, 2007;

PETRI, Setembrino; FÚLFARO, Vicente José. Geologia do Brasil. São Paulo: EDUSP, 1983.

SCHNEIDER, et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso brasileiro de Geologia. 1974. p. 41-65.

SINGER, P. E.; STUMM, W. 1970. Acid mine drainage: the rate determining step. Science, v. 167, p. 1121-1123, 1970;

STEVANATTO R.; SPINELLI T. M. Intergeo Ltda. – Geofísica aplicada pelo método da eletrorresistividade em depósitos de rejeito de carvão na unidade Charqueadas – RS. São Paulo, 2008.

SÜFFERT, T.; Carvão nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Informe de Recursos Minerais, Série Oportunidades Minerais. Exame Atualizado de Projetos, n.º 21, CPRM: Porto Alegre, 1997;

TELFORD WM, GELDART LP & SHERIFF RE. 1990. Applied geophysics. Second Edition. Cambridge: Cambridge University Press. 1990.

WHITE, I.C. 1908. Relatório sobre as reservas de carvão e rochas associadas no sul do Brasil. Relatório final. Comissão dos Estados das Minas de Carvão de Pedra do Brasil. Rio de Janeiro, parte 1, p.1-300. 1908.

WILDNER, W. et al. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala, v. 1, p. 750000, 2008.

ZALÁN, Pedro Victor *et al.* Bacia do Paraná. Origem e evolução das bacias sedimentares, p. 135-168, 1990.

8 ANEXOS

ANEXO 1 – Análises de efluentes do Capão da Roça

Tabela 17. Resultados das análises físico-químicas e químicas dos efluentes do ponto de amostragem CR07 com *outliers* retirados dos graficos das Figura 51, Figura 52, Figura 54, Figura 55, Figura 57, Figura 58, Figura 69 e Figura 70 assinalados em vermelho.

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
fev/08	0,581	0,374	0,184				394	26,5	6,6			289,2	
mar/08													
abr/08													
mai/08	2,7	0,691	0,369	0,012		0,005			6,3			654	
jun/08													
jul/08	2,07	1,58	0,448	0,011			1391	20,8	4,7	1232	15,4	1404	
ago/08	3,04	3,35	0,363				817	20,5	4,5	669	30,9	510	
set/08	2,47	3,88	0,383				764	18,3	4,4	557	32,8	522	
out/08	93	29	2,42	0,065	0,0059		4160	18,4	3,1	1857	502	1708	
nov/08	2,13	0,99	0,184	ND	ND	ND	4170	26,2	6,7	2608	ND	2639	
dez/08		0,99							6,7				
jan/09	0,483	3,06	0,374	< 0,01	0,0037	0,012		28,8	6,2	910	8,7	545	
fev/09	0,511	0,87	0,479	0,011	0,0083	0,012	1542	29,6	6,5	1309	4,3	683	
mar/09	0,714	0,598	0,641	< 0,01	0,0018	0,0031	3630	29,6	5,9	2733	10,9	1613	
abr/09													
mai/09	0,07	0,152	0,06	< 0,01	<0,001	0,0034	5120	21,6	6,9	3358	2	1969	
jun/09	0,246	0,383	0,05	< 0,01	<0,001	0,002	1330	13,8	6	1087	8,4	676	
jul/09													
ago/09													
set/09	0,902	0,34	0,199		0,0037	0,0078	423	18,5	5,9	292	8,76	160	6,1
out/09													
nov/09													
dez/09	1,7	1,06	0,273	< 0,01	<0,001	0,002		24,1	6,5	2903	6,12	2357	
jan/10	2,29	0,455	0,371	< 0,01	<0,001	0,006	884	25,9	3,7	581	32,8	259	
fev/10													
mar/10													
abr/10	0,711	0,875	0,159	< 0,01	<0,001	0,007	2260	21,8	3,9	1854	19,7	988	
mai/10													
jun/10	0,068	1,36					1684	17,5	5,3		15,4	855	1
jul/10	0,168	0,034	0,13	< 0,01	<0,001	0,002	729	18	6,4	514	2	301	
ago/10	0,3	0,423	0,165					17	6,2			292	
set/10	1,14	0,485	0,094	< 0,01	<0,001	0,007	306	19,8	6,5		4,37	118	12,9
out/10	10,9	3,6	0,738	< 0,01	<0,001	0,002	356	18	3,1	1287	99,8	1009	
nov/10	0,098	1,01	0,08					25	5,5			1107	
dez/10	0,138	1,52	0,386					26,9	5,2			638	
jan/11	0,051	2,343	0,482	< 0,01	<0,001	<0,01	1834	28	4,3	1798	23	1116	
fev/11	2,1	0,582	0,785					32	4,47			43	
mar/11	0,099	1,134	0,239	< 0,01	<0,001	<0,01	2333	27	4,2	540	14,4	248	0,34
abr/11	0,051	0,356	0,108					21	5,15			1666	
mai/11	0,06	1,2	0,163					19	4,77			275	
jun/11													
jul/11	< 0,01	< 0,01	< 0,01					8	5,73			1005	
ago/11	0,568	0,164	0,085					11	6,2			249	

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
set/11	0,557	0,107	0,16	< 0,01	<0,001	<0,01	706	16	6,75	493	1	350	1,6
out/11	0,404	0,208	0,198					24	4,93			820	
nov/11	0,173	0,213	0,229					29	6,4			1175	
dez/11	0,021	0,211	0,106	< 0,01	<0,001	<0,01	2007	28	5,05	1946	4,1	1510	
jan/12	< 0,01	0,04	< 0,01					26	5,39			1140	
fev/12	0,035	0,436	0,121					28	6,37			1435	
mar/12	0,021	0,129	0,898	< 0,01	<0,001	<0,01	2930	33	5,89	2696	2,9	1824	0,44
abr/12	0,053	0,789	0,093					23	4,4			858	
mai/12	0,068	0,678	0,172					22	5,92			876	
jun/12	0,084	1,5	0,101	< 0,01	<0,001	<0,01	2091	18	4,37	1909	22,6	1331	
jul/12	0,53	1,8	0,156					15	4,99			832	
ago/12													
set/12	0,17	0,633	1,2	< 0,01	<0,001	<0,01	1775	23	6,98	1324	4,1	758	8
out/12	0,192	0,143	0,512					24	7,01			528	
nov/12	0,201	0,205	0,845					25	6,06			1252	
dez/12	0,042	0,024	0,29	< 0,01	<0,001	<0,01	2031	26	6,27	1899	6,4	1406	
jan/13	0,105	1,715	0,074						8,38		7,5	762,5	
fev/13	0,836	0,261	1,008						6,77		10	680,18	
mar/13	0,105	0,883	0,241				2120	20	6,57		4,8	954,673	2,1
abr/13	0,105	1,03	0,555						6,08		12,07	1108,88	
mai/13	0,135	1,03	0,043						7,12		3,2	1261,04	
jun/13	0,136	1,843	0,07						6,37		1,5	1242,52	
jul/13	0,179	2,779	0,051						7,32		1,5	649,92	
ago/13	0,153	3,32	0,072						7,02		1,9	509,86	
set/13	0,12	2,223	0,041				1151	23,6	8,73		1,9	689,86	1,45
out/13	1,15	0,181	0,062						7,62		1,9	821,86	
nov/13	0,732	0,286	0,05						8,25		1,9	949,86	
dez/13	0,185	0,312	0,052						6,2		3,9	646,38	
jan/14	0,018	0,116	0,028						6,32		5	978	
fev/14	< 0,01	0,162	0,012						6,22		5	1333	
mar/14	0,03	0,097	0,311				1833	27	6,97		5	1119	0,27
abr/14	< 0,01	0,226	0,355						8,84		5	1086	
mai/14	0,03	0,101	0,033						7,22		5	1001	
jun/14	0,016	0,162	0,028						6,45		5	1106	
jul/14	0,116	0,129	< 0,01						7,92		5	675	
ago/14													
set/14	0,0113	0,0721	< 0,01				1220	19,7	6,38		5	65,2	0,57
out/14	0,0651	0,148	< 0,01						8,21		5	654	
nov/14	0,0299	0,11	0,0114						6,88		5	639	
dez/14	0,867	0,143	0,0847						6,35		7	642	
jan/15	0,0129	0,0847	< 0,01						6,18		5	645	0,6
fev/15	< 0,01	0,107	< 0,01						8,62		5	763	0,41
mar/15	< 0,01	0,118	< 0,01				1690	29,2	7,89		19	898	< 0,1
abr/15	< 0,01	0,0892	0,135						8,18		5	1090	0,11
mai/15	0,0335	0,116	0,0267						6,85		5	1190	0,12
jun/15	0,0476	0,357	0,0121				1260	18,7	6,95		5	546	0,82

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
jul/15	0,027	0,351	0,0101						6,68		5	319	1,56
ago/15	0,0638	0,169	< 0,01						7,5		5	373	0,15
set/15	< 0,01	0,0179	< 0,01				1130	20,2	8,12		5	545	0,26
out/15	0,409	0,0717	0,054						7,3		5	580	1,51
nov/15	0,18	0,0631	0,0263						8,57		5	537	0,98
dez/15	< 0,01	< 0,01	< 0,01				830	21,7	6,83		5	730	0,47
jan/16	< 0,01	0,0721	< 0,01						7,2		5	873	
fev/16													
mar/16	0,0436	0,0623	< 0,01				1510	24,9	7,7		5	652	0,25
abr/16	0,0216	< 0,01	< 0,01						7,4		5	586	
mai/16	0,0875	0,0292	0,0516						6,87		5	546	
jun/16	< 0,01	0,0293	0,0307				1320	18	6,2		5	151	0,38
jul/16													
ago/16													
set/16	0,065	0,0134	< 0,01				814	18,7	7,61		5	788	0,16
out/16													
nov/16													
dez/16	0,0528	0,155	< 0,01				1450	28,5	7,47		5	662	0,92
jan/17													
fev/17													
mar/17	0,0265	0,0707	0,0319				1440	30,2	7,97		5	877	0,44
abr/17													
mai/17													
jun/17	< 0,01	0,0406	< 0,01				993	18,4	6,36		5	556	1,11
jul/17													
ago/17													
set/17	0,0265	0,173	< 0,01				960	22,6	7,72		5	517	0,29
out/17													
nov/17													
dez/17	0,013	0,05	< 0,01				1160	25,6	6,15		5	673	0,27
jan/18	< 0,01	0,0463	< 0,01						6,34		5	598	
fev/18	0,107	0,0517	< 0,01						7,05		5	777	
mar/18	< 0,01	0,0476	< 0,01				1540	29,7	7,12		5	786	1,05
abr/18	0,407	0,149	< 0,01						7,86		5	707	
mai/18	< 0,01	0,189	< 0,01						8,11		5	773	
jun/18	0,017	0,185	0,026				3050	17,7	6,69		5	766	0,12
jul/18	0,037	0,193	0,012						7,12		5	313	
ago/18	0,038	0,109	< 0,01						8,2		5	418	
set/18	0,054	0,102	0,014				622	19,6	7,15		5	449	0,33
out/18	0,012	0,085	< 0,01						7,72		5	416	
nov/18	< 0,01	0,055	< 0,01						7,1		5	522	
dez/18	0,02	0,066	< 0,01				409	26,6	6,39		5	475	0,29
jan/19	0,0469	0,0485	< 0,01						6,32		5	596	
fev/19	0,023	0,088	< 0,01						6,41		5	663	
mar/19	< 0,01	0,073	< 0,01				701	30	7,51		5	25	0,3
abr/19	0,034	0,072	< 0,01						7,53		5	760	

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
mai/19	< 0,01	0,106	< 0,01						8,64		5	506	

Tabela 18. Resultados das análises físico-químicas e químicas dos efluentes do ponto de amostragem CR12 outliers retirados dos graficos das Figura 63 e Figura 64 assinalados em vermelho.

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
fev/08	208	5,56	7,03	0,151		0,037		26,5	3,2	3870		3087	
mar/08													
abr/08													
mai/08	27,5	11,1	2,17	0,068	ND	0,016	1750	20,6	3	1505		962	
jun/08													
jul/08	138	23,9	3,06	0,085	ND	0,0026	5088	20,2	2,5	2573		2461	
ago/08	107,2	23,4	1,11	0,029	ND	ND	4870	21,4	2,8	2036		2120	
set/08	104	25,6	2,45	0,063	ND	ND	4730	18,7	2,6	2054		2256	
out/08	123	25,8	3,1	0,078	0,0054	ND	5640	19,5	2,7	2417		2487	
nov/08	116	24,4	3,68	0,077	ND	ND	6050	30,2	2,5	2950		3182	
dez/08													
jan/09	247	43	5,15	0,107	0,0083	0,0055	6010	32,1	2,8	3560		2247	
fev/09	153	24,5	7,07	0,12	0,011	0,013	5928	29,2	2,5	3583		2296	
mar/09	151	25,7	3,72	0,087	0,0038	0,002	4975	28,8	2,6	3023		1891	
abr/09													
mai/09	232	26,8	4,3	0,093	<0,001	0,0034	7100	20,3	2,8	3694		2304	
jun/09	150	22	2,96	0,051	<0,001	0,002	3810	15,6	3	2163		1425	
jul/09													
ago/09													
set/09	55,4	1,87	1,87	0,039	0,0048	0,0061	2990	18,9	2,9	1734		795	
out/09													
nov/09													
dez/09	129	20,4	4,45	0,116	<0,001	0,002	4676	27	2,6	3527		3581	
jan/10	37,2	3,3	2,38	0,04	<0,001	0,006	3800	25,4	2,7	1598		963	
fev/10													
mar/10													
abr/10	37,2	9,02	3,25	0,05	<0,001	0,013	4320	23	2,7	2652		1331	
mai/10													
jun/10													
jul/10	51,2	6,76	2,1	0,03	<0,001	0,002	2810	17,8	3	1702		1047	
ago/10	47,5	5,61	2,32					19	2,5	1678		1037	
set/10	31,3	4,85	2,1					19,1	3			1062	
out/10	26,1	3,95	2,26	< 0,01	<0,001	0,002	486	21	2,8			1186	
nov/10	22,6	4,86	2,8					23	3			1444	
dez/10	16,3	9,22	3,06					28,1	2,8			1641	
jan/11	17,05	8,345	2,5	0,026	<0,001	<0,01	2900	27	2,1	2425		1670	
fev/11	17,4	7,5	2					29	2,87			1498	
mar/11	16,79	10,429	2,6	0,033	<0,001	<0,01	3068	25	2,19	2289		1467	
abr/11	16,2	13,6	1,9					22	2,83			1155	
mai/11	3,9	2,7	1,8					20	2,43			2142	
jun/11													
jul/11	43,9	9,6	2,7					11	2,53			1352	
ago/11	36,4	7,4	2,1					12	2,9			1043	

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
set/11	39	7	2,2	0,021	<0,001	<0,01	2897	18	3,07	1665		1520	
out/11	28,4	4,5	2,4					23	3			1010	
nov/11	9	4	2					26	2,7			1085	
dez/11	12,8	4,7	2	0,023	<0,001	<0,01	3542	28	2,75	2179		1705	
jan/12	8,2	3,9	1,3					26	2,76			1340	
fev/12	21,9	8,4	2,1					29	3,42			2431	
mar/12	32	10,6	2,9	0,031	<0,001	<0,01	3542	31	2,59	2910		2480	
abr/12	24,8	10,8	2					24	2,47			126	
mai/12	33,7	11,3	2,3					21	2,59			969	
jun/12	57,3	13,7	2,9	0,04	<0,001	<0,01	2781	20	2,5	2288		1698	
jul/12	45	9,6	1,5					14	2,76			1549	
ago/12													
set/12	27	9	1,8	0,03	<0,001	<0,01	2299	24	2,8	1379		799	
out/12	14,4	6	1,3					24	2,78			599	
nov/12	22,5	8	2					26	2,69			1220	
dez/12	32,4	6,8	2	0,023	<0,001	<0,01	2399	25	2,56	1942		1512	
jan/13	10,66	6,805	1,323						3,35		293,9	639,7	
fev/13	38,91	8,7	2,193						2,59		414,5	1139,64	
mar/13	48,13	10,32	2,12						2,71		251,1	1555	
abr/13	30,92	7,559	2,32						6,98		250,82	1227,103	
mai/13	41,85	8,443	1,721						2,87		210,2	1103,69	
jun/13	51,27	1,12	1,614						2,84		233,45	1117,52	
jul/13	23,87	7,24	0,898						3,06		177,4	462,42	
ago/13	25,14	8,864	1,263						2,7		247,8	800,86	
set/13	13,33	6,168	1,051						2,89		134,8	534,86	
out/13	18,9	4,61	1,29						3,08		136,4	819,86	
nov/13	6,78	3,292	1,075						2,88		122,7	809,86	
dez/13	15,3	4,112	1,02						3		106,3	651,43	
jan/14	7,9	3,2	1,5						2,88		133,9	1111	
fev/14	10,3	4,9	1,8						2,66		183,9	1238	
mar/14	9	4,2	1,5						2,69		169,8	1271	
abr/14	8,3	4,4	1,5						2,88		140,2	1378	
mai/14	15,9	4,1	1,4						2,35		166,8	1194	
jun/14	43,4	4,7	1,7						2,61		170,1	1307	
jul/14	20,9	3,22	1,07						2,46		111	743	
ago/14													
set/14	6,38	2,06	1,3						3,05		96	579	
out/14	5,82	2,3	1,34						3,06		152	672	
nov/14	6,38	2,32	1,62						3,1		83	728	
dez/14	5,14	1,74	1,27						2,67		107	1230	
jan/15	7,33	1,28	0,929						2,75		109	742	2,86
fev/15	6,68	1,82	1,41						2,65		123	745	0,44
mar/15	7,34	2,39	1,49						3		197	1590	0,41
abr/15	10,6	4,35	1,65						2,87		179	1170	0,64
mai/15	32,5	4,23	1,64						3,13		201	1250	8,14
jun/15	15,5	3,49	1,03						3,51		585	252	2,04

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
jul/15	5,15	1,9	0,632						3,04		70	338	2,76
ago/15	6,1	1,51	0,641						3,57		84	411	1,88
set/15	4,6	1,83	1,08						2,59		110	612	0,26
out/15	5,12	1,56	1,16						2,71		80	554	0,28
nov/15	2,83	1,03	1,04						4,44		69	600	0,32
dez/15	3,72	1,12	1,46						3,3		72	741	0,55
jan/16	4,24	1,24	1,28						2,92		90	1030	
fev/16													
mar/16	3,57	1,53	1,26						3,41		85	771	
abr/16	4,01	1,31	1,26						3,01		77	537	
mai/16	4,98	1,32	1,31						3,02		70	682	
jun/16													
jul/16													
ago/16													
set/16													
out/16													
nov/16													
dez/16													
jan/17													
fev/17													
mar/17													
abr/17													
mai/17													
jun/17													
jul/17													
ago/17													
set/17													
out/17													
nov/17													
dez/17													
jan/18	1,55	0,75	1,32						3,15		62	713	
fev/18	2,14	1,12	1,55						3,3		63	821	
mar/18	2,47	1,33	1,9						3,25		61	796	
abr/18	3,05	1,16	1,23						3,15		74	753	
mai/18	0,601	1,13	0,06						3,1		95	781	
jun/18	17	1,66	1,23						3,08		115	3960	
jul/18	3,67	0,759	0,496						3,02		48	291	
ago/18	3,11	0,825	0,702						3,18		49	429	
set/18	1,44	0,669	0,717						3,66		40	462	
out/18	1,49	0,553	0,782						3,4		35	432	
nov/18	1,33	0,523	0,957						3,3		43	518	
dez/18	0,932	0,485	0,908						3,42		75	477	
jan/19	0,882	0,436	0,996						2,9		42	607	
fev/19	1,01	0,44	1,17						3,03		52	682	
mar/19	1,02	0,576	1,21						3,91		52	699	
abr/19	1,49	0,67	1,21						3,31		48	735	

Mês de Análise	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Condutividade (ms/cm)	Temperatura (°C)	pH	STD (mg/L)	Acidez (mg/L CaCO ₃)	Sulfato (mg/L)	Turbidez (UNT)
mai/19	1,28	0,661	0,858						3,48		41	513	

ANEXO 2 – Resultados dos caminhamentos elétricos.

Tabela 19. Resultados obtidos junto ao caminhamento elétrico 01.

Posição do eletrodo A	Espaçamento entre os eletrodos	Nível medido	Resistividade Aparente
0	20	1	49,14
20	20	1	36,4
40	20	1	38,5
60	20	1	31,8
80	20	1	38,5
100	20	1	41,4
120	20	1	54,1
140	20	1	57,7
160	20	1	69,9
180	20	1	51,2
200	20	1	71,6
220	20	1	71,2
240	20	1	86,7
260	20	1	45,5
280	20	1	120
0	20	2	56,4
20	20	2	46,4
40	20	2	40,7
60	20	2	46,5
80	20	2	54,2
100	20	2	62,3
120	20	2	48,8
140	20	2	61,4
160	20	2	67,1
180	20	2	61,6
200	20	2	64
220	20	2	67,5
240	20	2	72,5
260	20	2	59,2
280	20	2	157
0	20	3	48,3
20	20	3	38,1
40	20	3	46,4
60	20	3	48,8
80	20	3	59,6
100	20	3	44
120	20	3	41,6
140	20	3	47,5
160	20	3	36,4
180	20	3	43,4
200	20	3	57,8
220	20	3	33,6
240	20	3	61,2
260	20	3	61,9
280	20	3	114,6
0	20	4	41,5
20	20	4	39,8
40	20	4	43,8
60	20	4	44,6
80	20	4	39,2
100	20	4	30,9
120	20	4	26,6
140	20	4	40,2
160	20	4	41,9
180	20	4	28,6
200	20	4	60,1
220	20	4	17,12
240	20	4	52,9
260	20	4	40,3
280	20	4	62,6
0	20	5	34,8
20	20	5	34,4
40	20	5	38,2

Posição do eletrodo A	Espaçamento entre os eletrodos	Nível medido	Resistividade Aparente
60	20	5	18,4
80	20	5	22,7
100	20	5	25,3
120	20	5	19,1
140	20	5	27,1
160	20	5	32,3
180	20	5	14,3
200	20	5	50,6
220	20	5	11,05
240	20	5	36,1
260	20	5	20,7
280	20	5	38,7
0	20	6	27,8
20	20	6	119
40	20	6	20,1
60	20	6	10,8
80	20	6	15,8
100	20	6	23,3
120	20	6	9,6
140	20	6	20,1
160	20	6	21,5
180	20	6	12,02
200	20	6	25,2
220	20	6	13,7
240	20	6	18,01
260	20	6	16,1
280	20	6	24,7

Tabela 20. Resultados obtidos junto ao caminhamento elétrico 02.

Posição do eletrodo A	Espaçamento entre os eletrodos	Nível medido	Resistividade Aparente
0	20	1	73,53
20	20	1	102,8
40	20	1	82,27
60	20	1	94,44
80	20	1	86,01
100	20	1	92,22
120	20	1	85,17
140	20	1	83,88
160	20	1	108,1
180	20	1	85,92
200	20	1	76,97
220	20	1	78,32
240	20	1	68,35
260	20	1	64,49
280	20	1	76,49
300	20	1	61,88
320	20	1	63,15
340	20	1	57,77
360	20	1	50,04
380	20	1	54,05
400	20	1	47,48
420	20	1	48,2
440	20	1	48,91
460	20	1	51,71
480	20	1	40,8
500	20	1	46,93
0	20	2	70,88
20	20	2	66,46
40	20	2	62,27
60	20	2	81,64
80	20	2	82,21
100	20	2	68,5
120	20	2	56,77
140	20	2	80,91
160	20	2	92,35
180	20	2	69,74
200	20	2	82,61
220	20	2	87,42
240	20	2	74,72
260	20	2	65,56
280	20	2	68,28
300	20	2	53,5
320	20	2	50,35
340	20	2	47,03
360	20	2	54,05

Posição do eletrodo A	Espaçamento entre os eletrodos	Nível medido	Resistividade Aparente
380	20	2	51,96
400	20	2	49,26
420	20	2	52,91
440	20	2	37,78
460	20	2	43,23
480	20	2	53,13
0	20	3	40,74
20	20	3	40,13
40	20	3	39,69
60	20	3	64,25
80	20	3	48,7
100	20	3	37,29
120	20	3	41,62
140	20	3	54,97
160	20	3	59,2
180	20	3	57,17
200	20	3	67,86
220	20	3	74,4
240	20	3	63,19
260	20	3	51,84
280	20	3	44,42
300	20	3	37,98
320	20	3	33,28
340	20	3	39,22
360	20	3	41,47
380	20	3	39,46
400	20	3	40,61
420	20	3	53,96
440	20	2	56,89
460	20	3	43,97
0	20	4	26,57
20	20	4	23,57
40	20	4	30,49
60	20	4	41,23
80	20	4	21,38
100	20	4	27,48
120	20	4	24,17
140	20	4	33,75
160	20	4	41,09
180	20	4	42,26
200	20	4	50,03
220	20	4	54,8
240	20	4	29,09
260	20	4	32,94
280	20	4	20
300	20	4	29,01
320	20	4	24,04

Posição do eletrodo A	Espaçamento entre os eletrodos	Nível medido	Resistividade Aparente
340	20	4	27,18
360	20	4	32,62
380	20	4	30,83
400	20	4	31,54
420	20	4	37,75
440	20	4	33,3
0	20	5	23,21
20	20	5	16,29
40	20	5	15,97
60	20	5	26,62
80	20	5	11,5
100	20	5	18,99
120	20	5	14,01
140	20	5	24,86
160	20	5	28,8
180	20	5	27,03
200	20	5	29,64
220	20	5	62,1
240	20	5	18,38
260	20	5	41,13
280	20	5	1,86
300	20	5	24,68
320	20	5	14,96
340	20	5	19,29
360	20	5	25,34
380	20	5	14,83
400	20	5	15,44
420	20	5	56,06
0	20	6	19,56
20	20	6	5,32
40	20	6	8,11
60	20	6	30,56
80	20	6	1,97
100	20	6	12,97
120	20	6	9,38
140	20	6	20,08
160	20	6	21,8
180	20	6	16,29
200	20	6	8,22
220	20	6	35,99
240	20	6	6,65
260	20	6	54,46
280	20	6	2,8
300	20	6	23,56
320	20	6	6,64
340	20	6	15,38
360	20	6	31,51

Posição do eletrodo A	Espaçamento entre os eletrodos	Nível medido	Resistividade Aparente
380	20	6	6,09
400	20	6	7,83