

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

**LEVANTAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS PARA INVESTIGAÇÃO DE  
CONTAMINAÇÃO POR CHORUME NA ÁREA DO ATERRO CONTROLADO DO  
MUNICÍPIO DE CALDAS NOVAS – GO**

Dissertação de Mestrado nº 201

**Bruna Rodrigues Carriel Junqueira**

Brasília – DF  
2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

**LEVANTAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS PARA INVESTIGAÇÃO DE  
CONTAMINAÇÃO POR CHORUME NA ÁREA DO ATERRO CONTROLADO DO  
MUNICÍPIO DE CALDAS NOVAS – GO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas; Área de Concentração: Geofísica rasa

**Orientador:** Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges.

Brasília – DF  
2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E GEODINÂMICA

**LEVANTAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS PARA INVESTIGAÇÃO DE  
CONTAMINAÇÃO POR CHORUME NA ÁREA DO ATERRO CONTROLADO DO  
MUNICÍPIO DE CALDAS NOVAS – GO**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges  
(Instituto de Geociências/Unb – Orientador)

---

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos  
Instituto de Geociências/Unb

---

Prof. Dr. Sérgio Júnior da Silva Fachin  
Faculdade de Geociências (FAGEO) / UFMT

Brasília – DF  
2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

JJ951

JUNQUEIRA, BRUNA RODRIGUES CARRIEL

Levantamento de dados geofísicos para investigação de contaminação por chorume na área do aterro controlado do município de Caldas Novas - GO / BRUNA RODRIGUES CARRIEL JUNQUEIRA; orientador Welitom Rodrigues Borges. -- Brasília, 2022.

106 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geociências Aplicadas) -- Universidade de Brasília, 2022.

1. Resistividade Elétrica. 2. GPR. 3. aterro controlado de Caldas Novas. 4. contaminação. 5. geofísica. I. Borges, Welitom Rodrigues, orient. II. Título.

*Dedico esse trabalho aos meus pais  
Aristeu e Eliana*

## AGRADECIMENTOS

À todas as pessoas que contribuíram e participaram direta e indiretamente deste ciclo acadêmico.

Aos meus avós, que desde cedo entoavam um mantra de incentivo aos estudos: “caderno e lápis”, inesquecível!

Aos meus pais, Aristeu e Eliana por sempre terem incentivado a educação e não terem medido esforços para que eu e minha irmã estudássemos.

À minha irmã Camila por ter, há 20 anos atrás, aberto as portas para a educação de qualidade em nossas vidas. Gratidão!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Ao meu orientador Welitom Borges por todo conhecimento, confiança e aprendizado durante esta etapa.

À querida amiga Victoria pelo apoio de campo.

Ao Victor, pela paciência e partilha de conhecimento.

À SEMMARH, Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Caldas Novas pelo incentivo e fomento.

Ao meu amigo, Sérgio Gustavo, gestor motivador e humano, que me incentivou, apoiou e me proporcionou as condições necessárias para realizar este estudo.

Aos meus amigos Matheus, Welder, Charles, Ytallo, Douglas, e Sr. Antônio por estarem sempre dispostos a ajudar, fazer campo no aterro não é para qualquer um!

Ao meu esposo Hugo pelo companheirismo e apoio, sempre.

Ao meu filho, Heitor, combustível da vida!

*Gratidão!*

*“O maior juiz dos seus atos deve ser você mesmo e não a sociedade. Aprenda as regras e quebre algumas”*

***Dalai Lama***

**JUNQUEIRA, BRC.** 2022. Levantamento de dados geofísicos para investigação de contaminação por chorume na área do Aterro Controlado do Município de Caldas Novas – GO. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.

## **RESUMO**

As políticas públicas e as discussões sobre o desenvolvimento sustentável, a resiliência e a melhor qualidade de vida têm sido temas em ascensão em escala mundial. No 11º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, o conceito de Cidades e Comunidades Sustentáveis objetiva entre outros, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, prestando especial atenção à gestão de resíduos, desde a coleta até a destinação final. As áreas utilizadas como depósito final de lixo normalmente representadas pelos "lixões" e aterros controlados configuram-se como focos potenciais de poluição, influenciando negativamente a qualidade da saúde humana e ambiental nas regiões sob sua influência. Os métodos geofísicos apresentam, nos estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas, resultados satisfatórios tanto nas fases de avaliação preliminar, quanto nas fases de monitoramento e remediação. Este trabalho descreve os procedimentos de campo e apresenta os resultados de eletrorresistividade e radar de penetração no solo (Ground Penetrating Radar – GPR) realizados no aterro controlado do município de Caldas Novas, Goiás. As investigações geofísicas objetivaram a determinação dos locais com possíveis contaminações por chorume, inclusive em células em que tiveram impermeabilização de base com geomembrana. Foram realizadas 23 seções de Ground Penetrating Radar (GPR), 16 com a técnica Common-Offset e 07 com Common Mid Point (CMP), e 09 de Eletrorresistividade, através da técnica de Caminhamento Elétrico. Com as seções de GPR identificaram-se padrões de reflexão típicos de solos, saprólitos, resíduos sólidos urbanos e porções atingidas por chorume. Os resultados dos modelos de profundidade obtidos por inversão 2D dos dados elétricos mostraram percolação de chorume (<100 ohm.m) vertical e lateralmente, com fluxo preferencial para leste, já ultrapassando os limites da área do aterro controlado.

**Palavras – Chave:** Resistividade elétrica, GPR, aterro controlado de Caldas Novas – GO, contaminação

**JUNQUEIRA, BRC.** 2022. Levantamento de dados geofísicos para investigação de contaminação por chorume na área do Aterro Controlado do Município de Caldas Novas – GO. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.

### **ABSTRACT**

Public policies and discussions on sustainable development, resilience and a better quality of life have been increasingly discussed topics on a global scale. In the 11th Sustainable Development Goal of the United Nations, the concept of Sustainable Cities and Communities aims, among others, to reduce the negative environmental impact per capita of cities, paying special attention to waste management, from collection to final destination. The areas used as final garbage disposal, normally represented by "dumps" and controlled landfills, are configured as potential sources of pollution, negatively influencing the quality of human and environmental health in the regions under their influence. The geophysical methods present, in soil and groundwater contamination studies, satisfactory results both in the preliminary assessment phases and in the monitoring and remediation phases. This work describes the field procedures and presents the results of electroresistivity and ground penetrating radar (Ground Penetrating Radar – GPR) carried out in the controlled landfill in the municipality of Caldas Novas, Goiás. The geophysical investigations aimed to determine the places with possible leachate percolation, including in cells where they had base waterproofing with geomembrane. Twenty-three Ground Penetrating Radar (GPR) sections were performed, 16 with the Common-Offset technique and 07 with the Common Mid Point (CMP), and 09 of Electroresistivity, through the Electric Walking technique. With the GPR sections, typical reflection patterns of soils, saprolites, urban solid waste and portions affected by leachate were identified. The results of the depth models obtained by 2D inversion of electrical data (100 ohm.m) showed leachate percolation vertically and laterally, with flow to the east, already exceeding the limits of the controlled landfill area.

**Keywords:** Electroresistivity, GPR, Caldas Novas – GO controlled landfill, contamination

## Sumário

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	3
1.1.1	<i>Objetivos Específicos .....</i>	<i>3</i>
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>5</b>
2.1	LOCALIZAÇÃO .....	5
2.2	HISTÓRICO DO ATERRO CONTROLADO .....	5
2.3	GEOLOGIA .....	9
2.4	PEDOLOGIA .....	10
2.5	HIDROGEOLOGIA .....	11
2.6	GEOMORFOLOGIA.....	14
2.7	HIDROGRAFIA .....	15
2.8	TOPOGRAFIA .....	16
2.9	CLIMA.....	17
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
3.1	GROUND PENETRATING RADAR .....	20
3.1.1	<i>Conceito e Princípios Básicos .....</i>	<i>20</i>
3.1.2	<i>Coeficiente de Reflexão .....</i>	<i>23</i>
3.1.3	<i>Profundidade de Penetração .....</i>	<i>24</i>
3.1.4	<i>Técnicas de Aquisição de dados .....</i>	<i>24</i>
3.2	ELETRORRESISTIVIDADE .....	25
3.2.1	<i>Conceito e Princípios Básicos .....</i>	<i>26</i>
3.2.2	<i>Fluxo de corrente no solo.....</i>	<i>28</i>
3.2.3	<i>Arranjos de Eletrodos .....</i>	<i>30</i>
<b>4.</b>	<b>ARTIGO 1 .....</b>	<b>35</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	36
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	39
4.3	RESULTADOS.....	42
4.4	DISCUSSÃO .....	45
4.5	CONCLUSÃO .....	45
4.6	REFERÊNCIAS .....	46
<b>5.</b>	<b>ARTIGO 2.....</b>	<b>50</b>
5.1	INTRODUÇÃO.....	52
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	55

5.3	RESULTADOS.....	62
5.4	CONCLUSÕES.....	75
5.5	REFERÊNCIAS.....	77
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 2-1</b> Localização do Aterro Controlado de Caldas Novas, estado de Goiás.....	5
<b>Figura 2-2</b> Série Histórica de imagens mostra a evolução do Lixão Municipal de Caldas Novas para Aterro Controlado. A) Início do uso da área, com resíduos depositados na porção central. B) Uso e encerramento da célula sanitária ao sul. C) Expansão para a porção central da disposição de resíduos, de forma irregular. D), E), F) Disposição irregular ao norte. G) Funcionamento da célula ao norte e início da construção da célula sanitária logo ao sul. H) Encerramento da célula ao norte. Início do uso da célula sanitária. Obras de infraestrutura para implantar um galpão de triagem de resíduos na área central. I) Operação atual.....	8
<b>Figura 2-3</b> Comparativo da área quando era lixão e como está hoje, aterro controlado. A) Situação em 2018, com disposição irregular de resíduos. B), C) e D) Imagens de 2019 após a contratação de empresa terceirizada para gerir e operacionalizar o local. ....	9
<b>Figura 2-4</b> Mapa Geológico de parte do município de Caldas Novas, com ênfase para a área do Aterro Controlado. Fonte: Moreira, et al. 2008. ....	10
<b>Figura 2-5</b> Mapa de Solos de parte do município de Caldas Novas, com ênfase para a Área do Aterro Controlado. Fonte: Sousa, 2018 modificado. ....	11
<b>Figura 2-6</b> Mapa dos Sistemas Aquíferos de parte do município de Caldas Novas, com ênfase para a Área do Aterro Controlado. Fonte: Almeida, et al. 2006.....	13
<b>Figura 2-7</b> Unidades Geomorfológicas do Estado de Goiás, com ênfase para o município de Caldas Novas. Fonte: Latrubesse, et al. 2006 .....	15
<b>Figura 2-8</b> Contextualização hidrográfica do município de Caldas Novas, com ênfase para a área do aterro controlado .....	16
<b>Figura 2-9</b> Mapa de Elevação da região onde está inserido o aterro controlado de Caldas Novas. Fonte: SRTM – Folha SE.22-X-D. ....	17
<b>Figura 2-10</b> Dados pluviométricos entre os anos de 2006 e 2020, obtidos na Estação Meteorológica Serra de Caldas (17°46'55,189"S / 48°41'14,132"W). Fonte: AMAT - Associação dos Mineradores de Águas Termais. ....	18
<b>Figura 2-11</b> Médias mensais da temperatura entre os anos de 2008 e 2020, obtidas na Estação Meteorológica Serra de Caldas (17°46'55,189"S / 48°41'14,132"W). Fonte: AMAT - Associação dos Mineradores de Águas Termais.....	18
<b>Figura 2-12</b> Médias mensais da umidade entre os anos de 2008 e 2020, obtidas na Estação Meteorológica Serra de Caldas (17°46'55,189"S / 48°41'14,132"W). Fonte: AMAT - Associação dos Mineradores de Águas Termais.....	19

<b>Figura 3-1</b> a) Procedimento de Levantamento Commom Offset com espaçamento fixo. b) Traços GPR mostrando a chegada da onda aérea, da onda na terra e da onda refletida no substrato em subsuperfície (BORGES, 2002). .....	24
<b>Figura 3-2</b> Esquema de sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b)WARR. (BORGES, 2007).....	25
<b>Figura 3-3</b> Esquema de sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b)WARR. (BORGES, 2007).....	27
<b>Figura 3-4</b> Configuração geral dos eletrodos utilizada em medições de resistividade	29
<b>Figura 3-5</b> Configuração geral dos eletrodos utilizada em medições de resistividade	30
<b>Figura 3-6</b> Representação gráfica do Arranjo eletródico Wenner Alfa, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão $K = 2\pi a$ . .....	31
<b>Figura 3-7</b> Representação gráfica do Arranjo eletródico Schlumberger, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão $k = 2\pi b^2/a \times [1 - (a^2/(4b^2))]$ .....	32
<b>Figura 3-8</b> Representação gráfica do Arranjo eletródico Wenner – Schlumberger, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão $k = \pi n (n+1)a$ .....	32
<b>Figura 3-9</b> Representação gráfica do Arranjo eletródico Dipolo – Dipolo, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão $k = 2\pi G a$ , sendo que $G = 1/[(1/n) - (2/(n+1)) + (1/(n+2))]$ .....	32
<b>Figura 3-10</b> Representação Gráfica do Arranjo eletródico, Polo – Dipolo, cujo Fator geométrico pode ser obtido com a expressão $k = 2\pi G a$ , sendo que $G = 1/[(1/n) - (1/(n+1))] = n (n+1)$ .....	33
<b>Figura 3-11</b> Subdivisão da subsuperfície em blocos retangulares para interpretar dados de um imageamento bidimensional. (a) Modelo com algoritmo padrão e com número maior de blocos que o número de pontos de referência (datums) (adaptado de Loke,2001) Subdivisão da subsuperfície em blocos retangulares para interpretar dados.....	34
<b>Figura 4-1</b> Mapa de localização da área de estudo com ênfase nos perfis da TRE. O perfil L1 foi adquirido de SO (sudoeste) para NE (nordeste), e o perfil L2 de L (leste) a O (oeste).....	38
<b>Figura 4-2</b> Mapa Geológico simplificado da região de Caldas Novas – Rio Quente, mostrando a posição da área de estudo. Moreira et al. (2008). .....	38
<b>Figura 4-3</b> Materiais usados para aquisição de campo. A) SuperSting conectado a cabos; B) Eletrodo de aço inoxidável conectado aos cabos; C) Montagem em linha; D) Cabos com 14 saídas cada; E) Monitoramento de Aquisição. ....	40
<b>Figura 4-4</b> Pontos de dados registrados em cada arranjo após a filtragem de picos de ruído. Linha 1 (A) Dipolo - Dipolo, (B) Schlumberger, (C) Polo-Dipolo; Linha 2 (D) Dipolo - Dipolo, (E) Schlumberger, (F) Polo-Dipolo. ....	41

<b>Figura 4-5</b> Modelo Digital de Elevação do Aterro Sanitário Controlado de Caldas Novas, Goiás, Brasil. Os volumes destacados foram usados para calcular a espessura de resíduos em duas valas de resíduos.....	41
<b>Figura 4-6</b> Comparação entre os modelos de resistividade obtidos nas Linha L1 e L2 após inversão utilizados para delimitar a Base do Aterro (interpretado).....	42
<b>Figura 4-7</b> Seções GPR adquiridas junto às células de resíduos. (A) Seção GPR paralela à seção de Resistividade da L1. (A1) e (A2) detalhes da seção GPR com indicação de foliações rochosas, possível quartzito. (B) Seção GPR paralela à Seção de Resistividade da L2. ....	44
<b>Figura 5-1</b> Mapa geológico simplificado da região de Caldas Novas e Rio Quente, estado do Goiás (Moreira et al, 2008). ....	54
<b>Figura 5-2</b> Imagem de drone georreferenciada com a localização das seções de GPR, sondagens de velocidade do tipo CMP, e seções de resistividade elétrica, adquiridas no Aterro Controlado de Caldas Novas, Goiás. ....	56
<b>Figura 5-3</b> Fotografias evidenciam a aquisição de dados de GPR na área do Aterro Controlado de Caldas Novas - GO. (A) e (B) Coleta de dados GPR com a técnica Common Offset com o equipamento SIR3000 e antenas blindadas de 200 MHz. (C) e (D) Aquisição de sondagem de velocidade (CMP) com antenas não blindadas de 80 MHz. ....	57
<b>Figura 5-4</b> Sondagens de velocidade do tipo CMP, após a correção do tempo zero, com a indicação das velocidades da onda direta no ar e da onda direta no solo. Nas CMPs realizadas dentro das cavas de resíduos sólidos não há registro da velocidade da onda direta no solo, o que indica absorção total do sinal já na parte superficial do solo.....	59
<b>Figura 5-5</b> Modelos e painéis de velocidade obtidos após a análise das sondagens de velocidade do tipo CMP obtidos na área do Aterro Controlado de Caldas Novas, GO. ....	60
<b>Figura 5-6</b> Fotografias evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica na área do Aterro Controlado de Caldas Novas. (A) Foto de operador conectando os cabos multieletródicos. (B) Foto detalha eletrodo conectado ao cabo multieletródico. (C) Detalhe do el eletrorresistívmetro Supersting conectado ao computador de eletrodos (Switch box). (D) Foto confirma a equipe durante a aquisição de dados de resistividade elétrica.....	61
<b>Figura 5-7</b> Dados dos pontos gravados em cada seção após filtragem de ruídos. (A) Line 1 (L1), (B) Line 2 (L2), (C) Line 3 (L3), (D) Line 4 (L4), (E) Line 5 (L5), (F) Line 6 (L6), (G) Line 7 (L7), (H) Line 8 (L8), (I) Line 9 (L9).....	62

<b>Figura 5-8</b> (A) Referência da localização. (B)GPR (Commom - Offset) Seção a montante da área do aterro controlado. (B) Detalhes da seção de GPR, mostrando as possíveis foliações de rochas quartzíticas. (C) Seção de resistividade na mesma linha da seção de GPR. ....	66
<b>Figura 5-9</b> (A) Referência da localização. (B) GPR (Commom - Offset) Seção sobre uma célula de deposição de resíduos. (C) Detalhe do padrão de reflexão observado. (D) Seção de resistividade na mesma linha da seção de GPR. ....	67
<b>Figura 5-10</b> (A) Referência de localização. (B) Detalhe da acumulação de chorume no sopé do talude leste da célula 2. (C) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR. (D) Seção de resistividade interpretada. (E) Seção de GPR (Commom - Offset) (com início a 96m do início da seção de eletrorresistividade) sobre a célula de resíduos encerrada. (F) Detalhe do padrão de reflexão observado .....	68
<b>Figura 5-11</b> (A) Referência da localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR. (C) Seção de resistividade interpretada. (D) Seção de GPR (Commom - Offset) (com o mesmo início da seção de eletrorresistividade) sobre a célula de resíduos encerrada. (E) Detalhe do padrão de reflexão observado .....	69
<b>Figura 5-12</b> (A) Referência da localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR. (C) Seção de resistividade interpretada. (D) e (F) GPR (Commom - Offset) Seções sobre a célula de lixo. (E), (G) e (H) Detalhe do Padrão de reflexão observado.....	70
<b>Figura 5-13</b> (A) Referência de localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR interpretada. (C) e (E) Seções GPR (Commom - Offset). (D) e (F) Detalhe do Padrão de reflexão observado. ....	71
<b>Figura 5-14</b> (A) Referência de localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR interpretada. (C) Seção GPR (Commom - Offset) section). (D) Detalhe do Padrão de reflexão observado. ....	72
<b>Figura 5-15</b> (A) Referência de localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR interpretada. (C) Seção de GPR (Commom - Offset) section). (D) e (E) Detalhe do Padrão de reflexão observado. ....	73
<b>Figura 5-16</b> (A) Referência de localização. (B) Seção de GPR (Commom - Offset) section). (C) Padrão de reflexão observado.....	74
<b>Figura 5-17</b> (A), (B) and (C) Seções de GPR com interpretação do nível de água.....	74
<b>Figura 5-18</b> Localização das áreas contaminadas observadas nas aquisições geofísicas, bem como a direção de migração da pluma de contaminação. ....	75

## **Lista de tabelas**

<b>Tabela 2-1</b> Proposta de classificação dos aquíferos subterrâneos do estado de Goiás (ALMEIDA, 2006). .....	11
<b>Tabela 4-1</b> Parâmetros das configurações usadas nos arranjos Polo Dipolo (PD), Dipolo-Dipolo (DD) e Schlumberger (SH).....	39
<b>Tabela 5-1</b> Parâmetros de aquisição dos dados de resistividade elétrica obtidos na área do Aterro Controlado de Caldas Novas, GO. ....	61
<b>Tabela 5-2</b> Padrões de reflexão do sinal eletromagnético do GPR identificados nas seções de GPR realizadas na área do Aterro Controlado de Caldas Novas, GO	64

## Lista de Símbolos

$\vec{E}$	Intensidade do campo elétrico
$\vec{H}$	Campo magnético
$\vec{B}$	Indução magnética
$\vec{D}$	Corrente de deslocamento
$\vec{J}$	Densidade da corrente
$\sigma$	Condutividade elétrica
$\varepsilon$	Permissividade dielétrica
$\varepsilon_r$	Permissividade dielétrica relativa
$\varepsilon_0$	Permissividade dielétrica do vácuo
k	Constante dielétrica
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo
K	Fator geométrico
Re	Coeficiente de reflexão
V	Velocidade das ondas de rádio
$\rho$	Resistividade
$\rho_a$	Resistividade aparente
R	Resistência
I	Corrente elétrica
$\phi$	Porosidade
f	Fração de poros contendo água
$\rho_w$	Resistividade da água
$\delta V$	Diferença de potencial
EM	Eletromagnético
GPR	Ground Penetrating Radar ou Georadar

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

As políticas públicas e as discussões sobre o desenvolvimento sustentável, a resiliência e a melhor qualidade de vida têm sido temas em ascensão em escala mundial, a exemplo dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela [Organização das Nações Unidas \(ONU\) em 2015](#) aos seus países membros. Em seu 11º Objetivo, o conceito de Cidades e Comunidades Sustentáveis objetiva entre outros, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, prestando especial atenção à gestão de resíduos, desde a coleta até a destinação final.

O tema tem sido arrolado em todas as esferas governamentais do Brasil, a exemplo da aprovação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS – [Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010](#)), na qual foram regulamentadas todas as diretrizes para o manejo adequado de resíduos sólidos em território nacional, a serem implantadas, inicialmente até 2014, posteriormente alterada conforme população e posição geográfica.

No entanto, é notório que todos os esforços legislativos não alcançam os resultados desejados na ponta da cadeia. Segundo o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos ([SNIS, 2019](#)), há no país 1.114 lixões, 580 aterros controlados e 621 aterros sanitários o que demonstra a dificuldade financeira e administrativa em atender às normas e as políticas públicas vigentes.

Desse total de 2315 locais de disposição, 25% corresponde aos aterros controlados, sendo a região Centro Oeste representada por apenas 37 unidades, ou seja, 6%, e é neste contexto que se encontra a cidade de Caldas Novas – GO, objeto do estudo que será apresentado neste trabalho.

De acordo com [ABNT NBR 8849/1985](#) – O aterro controlado é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos diretamente no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à sua segurança, reduzindo os impactos ambientais. Esse método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte todos os dias ou conforme demanda, no entanto todo o material é manuseado sem tratamento, o que seria exigido em um Aterro Sanitário, conforme [ABNT NBR 8419/1992](#), que trata das condições para a implantação deste empreendimento.

Vale ressaltar que, segundo [Liu et al. \(2016\)](#), mesmo sendo o aterro sanitário uma forma admissível de disposição de resíduos, permanece como um empreendimento ambientalmente impactante.

As áreas utilizadas como depósito final de lixo normalmente representadas pelos "lixões" e aterros controlados configuram-se como focos potenciais de poluição, influenciando negativamente a qualidade da saúde humana e ambiental nas regiões sob sua influência (SISINNO e MOREIRA, 1996). Os aterros sanitários, embora empreendidos dentro das exigências legais, também apresentam potencial poluidor, principalmente quando se pondera os riscos de acidentes ambientais com a percolação de chorume, que, segundo Christensen et al. (2001), é uma solução à base de água de compostos lixiviados do lixo, originada pelo excesso de percolação de água pluvial através de suas camadas.

Nesse contexto, a ABNT editou a NBR 15935/2011 que trata da Aplicação de Métodos Geofísicos em Investigações ambientais, dentre outros, para averiguar contaminantes e fontes de contaminação utilizando os métodos de Eletorresistividade, Ground Penetrating Radar, Potencial Espontâneo, Sísmica de Refração e de Reflexão, entre outros.

Os métodos geofísicos são uma alternativa no diagnóstico de áreas contaminadas em razão da rapidez e do custo reduzido, quando comparado com os ensaios destrutivos, em estudos ambientais. Esta ferramenta pode auxiliar na detecção e no monitoramento de áreas contaminadas, em conjunto com métodos diretos de investigação, como poços de monitoramento (Moreira & Braga, 2009; Lopes et al., 2012; Koda & Osiński, 2016; Koda et al., 2017; Ferrer Ramos, 2019).

A utilização de métodos geoeletricos nos estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas apresentam resultados satisfatórios tanto nas fases de avaliação preliminar, quanto nas fases de monitoramento e remediação. Os produtos finais minimizam custos de campo e apontam os locais mais adequados para a instalação de poços de monitoramento, além de apresentar informações geológicas e hidrogeológicas da área (BRAGA, 2016).

Os resultados de geofísica em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos mostram eficiência nas investigações em Bacellar & Catapreta (2010), que aplicaram Caminhamento Elétrico (CE), com arranjo dipolo-dipolo objetivando delimitar detalhadamente a geometria e a extensão da pluma de contaminação na área do Aterro Sanitário de Belo Horizonte - MG. José Tavares Araruna Júnior et al. (2016) aplicaram GRP no lixão municipal de Gramacho, Duque de Caxias – RJ e pôde detectar superfícies de falha nas encostas e dentro da massa de resíduos, bem como lixiviado e gases dentro do maciço. Porsani et al. (2004) aplicaram o método de Georadar na área e entornos do aterro sanitário de Rio Claro – SP a fim de investigar a extensão lateral da contaminação e de Eletorresistividade para investigar a extensão vertical, definir a base do pacote de resíduos, o nível de água e a estratigrafia. Pomposiello et al. (2012)

apresentaram os resultados da pesquisa com Georadar e eletrorresistividade na área de disposição de resíduos em Gualeguaychú, Argentina, em que mapearam o pacote de lixo, a extensão lateral pluma de contaminação e a profundidade do nível de água. [Olofsson et al \(2006\)](#) testaram a integração dos dados de geofísica e geoquímica para caracterizar a origem da salinidade no entorno do aterro de Tveta, Suíça.

No município de Caldas Novas – GO, localizado na região centro-oeste do país, data da década de 90 o início do uso de uma área escolhida a esmo pela gestão pública para depositar os resíduos sólidos urbanos em formato lixão, sendo que tal prática se estendeu até meados de 2018, quando a operação e gerenciamento da área foi objeto de concorrência pública. A empresa privada vencedora da licitação passou a mitigar os impactos, dobrando e enterrando o rejeito e uma cooperativa de catadores iniciou a triagem dos resíduos. O contrato previu ainda a construção de uma vala sanitária, que hoje já se exauriu, voltando o lixo ser descartado a céu aberto.

Por isso, o passivo que se encontra no local devido aos anos de negligência ambiental, precisa ser identificado para dar condições ao poder público de mensurar os danos e planejar o encerramento e recuperação da área.

Neste contexto, a Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, da Prefeitura Municipal de Caldas Novas, em parceria com o Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade de Brasília, iniciou em 2019, as investigações geofísicas no Aterro Controlado de Caldas Novas.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral do estudo é desenvolver o mapeamento geofísico de áreas potencialmente contaminadas por lixiviados no Aterro Controlado de Caldas Novas, estado de Goiás, utilizando os métodos geofísicos de *Ground Penetrating Radar* (GPR) e de *Eletrorresistividade*.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- Descrever e identificar os padrões de reflexões do GPR relacionados aos resíduos sólidos urbanos, aos pacotes de sedimentos inconsolidados, saprólitos e rochas da região, bem como correlacionar refletores às superfícies de discontinuidades geológicas (falhas, fraturas e foliações).
- Localizar eventuais áreas de percolação e concentração de chorume no subsolo usando-se modelos de resistividade elétrica obtidos ao longo da área de pesquisa.

- Determinar a posição e a geometria de eventuais plumas de contaminação do subsolo a partir dos dados obtidos.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos com objetividade no conteúdo abordado.

No Capítulo 1, apresenta-se uma abordagem sobre o problema da disposição de resíduos, sua conseqüente contaminação por chorume e os objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2, identifica-se a localização da área de estudo e relata um breve histórico da área do aterro controlado com imagens. Neste capítulo, também se apresentam as características fisiográficas da região.

No capítulo 3, são descritos os princípios básicos dos métodos de Ground Penetrating Radar e de Eletrorresistividade.

O Capítulo 4, está organizado em formato de artigo intitulado “Análise comparativa entre arranjos de resistividade elétrica para delimitação de pluma contaminação no aterro controlado de Caldas Novas, Goiás, Brasil”.

O Capítulo 5, também está estruturado em formato de artigo com o título “Comportamento do lixiviado em células de lixo com e sem geomembrana no aterro controlado de caldas novas – go com o uso de GPR e Eletrorresistividade”.

Por fim, as principais conclusões e recomendações do estudo são apresentadas no Capítulo 6.

# CAPÍTULO 2

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização

O aterro controlado de Caldas Novas – GO localiza-se dentro do perímetro urbano do município, com acesso rodoviário pelas vias GO – 213 ou GO – 139 (Figura 2-1).

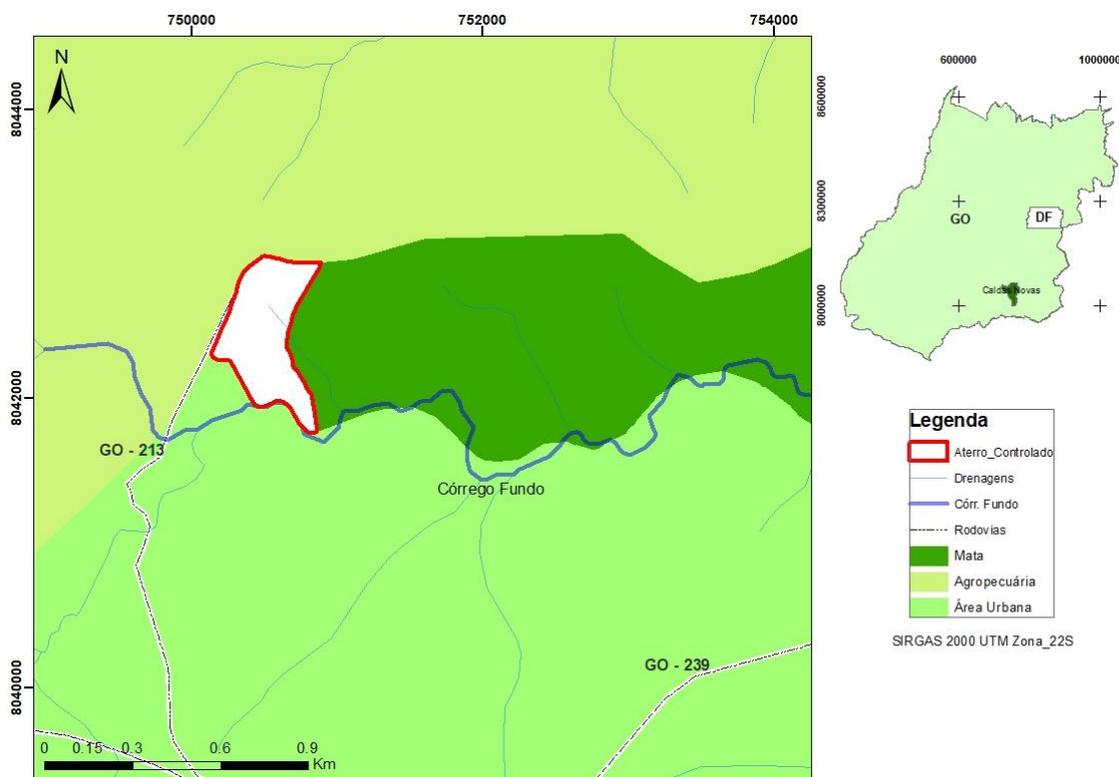


Figura 2-1 Localização do Aterro Controlado de Caldas Novas, estado de Goiás.

A área encontra-se numa vertente com aproximadamente 6 a 8% de declividade, e possui 50 hectares de área, 3,5 quilômetros de perímetro e dista em torno de 10Km do centro urbano, bem como do Parque Estadual da Serra de Caldas (PESCaN).

O limite sul da área é limitado pelo Córrego Fundo, afluente do Ribeirão Pirapitinga. Ao norte e oeste encontram-se áreas de agricultura e a leste, mata nativa.

### 2.2 Histórico do Aterro Controlado

Face à carência de informações formais sobre o início do então lixão municipal de Caldas Novas – GO, identifica-se, pelo histórico disponível nas imagens de satélite da área, que a sua ocupação é anterior a 2002, época em que já era depositado lixo no local, lançado diretamente no solo e sem cobertura.

A série histórica supracitada está ilustrada na Figura 2-2.

Em 2010, registro seguinte à primeira imagem de satélite disponível, observa-se uma recuperação parcial da área e um avanço da disposição do lixo para sul, ainda sem adequação às técnicas de engenharia.

Neste mesmo ano, em vistoria realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado, o aterro já possuía o isolamento da maior parte da área por meio de barreira física (cerca de arame liso) e vegetal (sansão do campo); existia uma guarita e portão de acesso, presença de uma balança em condições de uso e abastecimento com água tratada. Entretanto, em termos gerais, o referido aterro não atendia às recomendações das normas técnicas para ser devidamente licenciado no órgão competente. O aterro de Caldas Novas recebia em 2010, segundo os apontamentos, em média, de 70 a 100 toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos.

Outra irregularidade observada na vistoria realizada pelos técnicos da época, dizia respeito à disposição dos resíduos de serviços de saúde (RSS). Na data da vistoria, os RSS que chegavam ao aterro eram enterrados sobre uma antiga vala séptica, sem passar por tratamento prévio.

Em vistoria realizada no aterro em 2010 pelo Ministério Público, constatou-se a existência de um galpão de triagem de resíduos recicláveis no seu interior, o qual continha um funil de esteira, esteira, triturador, peneira rotativa e duas prensas, sendo operado pela Cooperativa de Catadores de Lixo, que contava, à época, com aproximadamente 35 pessoas.

A cooperativa se desfez nos anos subsequentes. Assim, a partir do final do ano de 2013, a disposição de resíduos começou a se deslocar sentido norte de maneira irregular. A pilha de lixo formada até então foi encerrada, bem como a utilização da lagoa chorume. Dessa maneira, o lixo passou a ser descartado em duas células, simplesmente abertas, sem cumprir as exigências técnicas, conforme pode ser observado a partir de 2016. Enquanto isso, a antiga área utilizada ao sul foi revegetada.

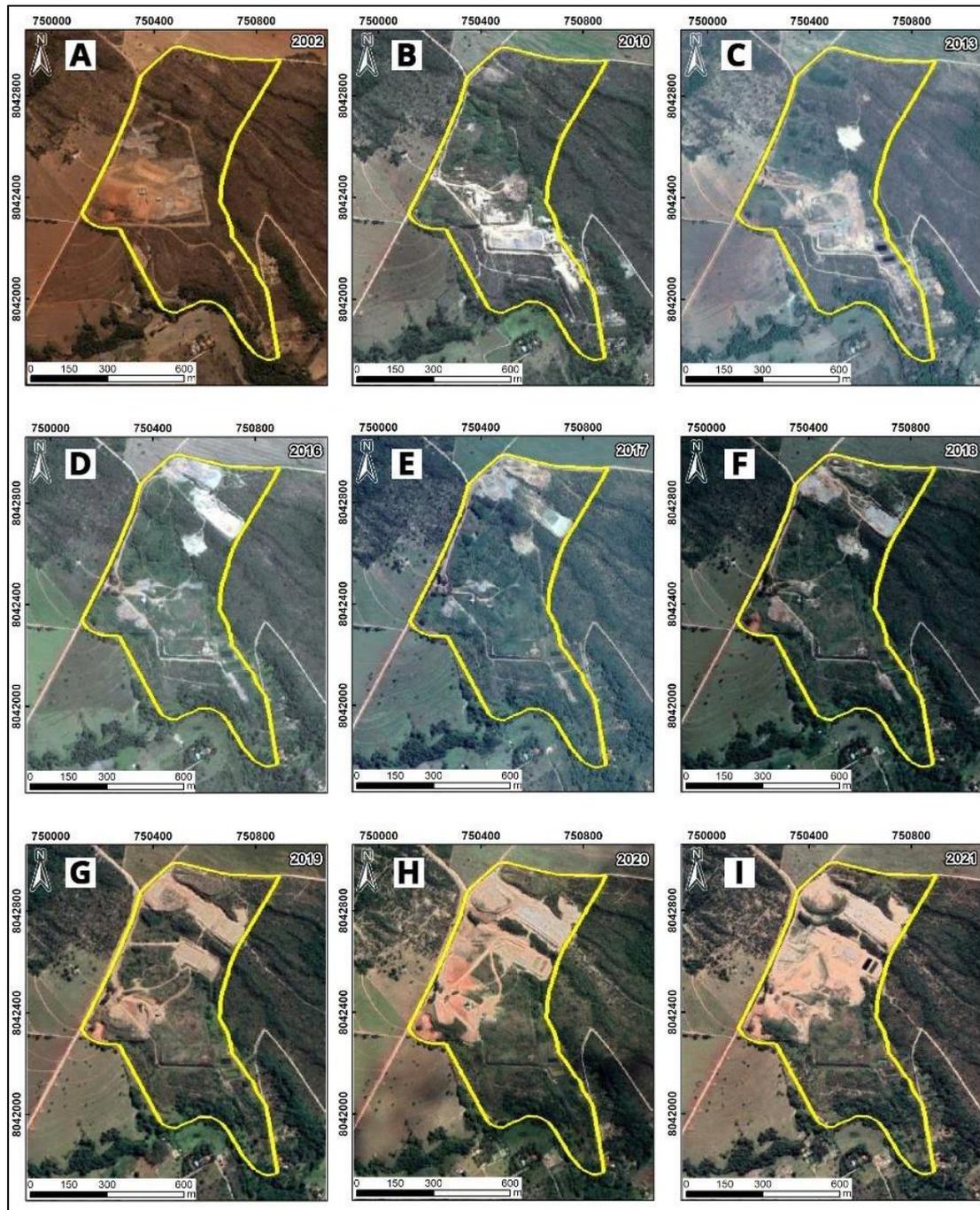
Em meados de 2018, a partir de uma nova gestão na Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do município, foi desencadeada uma ação junto a fiscalização ambiental municipal, polícia militar e ministério público, a fim de encerrar o lixão municipal e as atividades irregulares de catadores. Uma empresa privada assumiu a gestão e operação do local com o objetivo de transformá-lo em aterro controlado e construir uma célula sanitária para recebimento dos futuros resíduos sólidos urbanos. Os resíduos de construção civil passaram a ser britados para utilização em acessos dentro do próprio aterro, e foi fundada uma cooperativa com os catadores que já atuavam nas dependências da área pública.

Em 2019, a nova célula, bem como suas lagoas de chorume ficaram prontas e em meados de 2020 passou a operar logo abaixo da célula encerrada ao norte, que recebeu algumas medidas paliativas de controle como dreno de gases.

Por fim, as imagens de 2020 e 2021 já ilustram que a área foi controlada, e pode ser observada a vala sanitária em funcionamento, células antigas com cobertura e dreno de gases e o galpão da cooperativa em operação para diminuir os impactos ambientais e aumentar a vida útil da célula.

A área onde foi implantado o antigo lixão não se adequa às normas técnicas e exigências ambientais para ser licenciada como aterro sanitário, como por exemplo devido à proximidade com núcleos urbanos e distância de cursos d'água. Logo, ainda que houvesse a remediação total dos passivos e a implantação dos sistemas corretos, não seria viável continuar depositando resíduos na área, motivo pelo qual o município tem o prazo até o final de 2022 para encontrar outro local para disposição de resíduos sólidos urbanos.

Vale ressaltar que, muito embora, os passivos deixados no local sejam expressivos, visto o histórico evolutivo apresentado, em 2021 a realidade ambiental, bem como a salubridade para quem trabalhava no local, melhorou consideravelmente, devido a operacionalização profissional que se instalou em 2018 (Figura 2-3).



**Figura 2-2** Série Histórica de imagens mostra a evolução do Lixão Municipal de Caldas Novas para Aterro Controlado. A) Início do uso da área, com resíduos depositados na porção central. B) Uso e encerramento da célula sanitária ao sul. C) Expansão para a porção central da disposição de resíduos, de forma irregular. D), E), F) Disposição irregular ao norte. G) Funcionamento da célula ao norte e início da construção da célula sanitária logo ao sul. H) Encerramento da célula ao norte. Início do uso da célula sanitária. Obras de infraestrutura para implantar um galpão de triagem de resíduos na área central. I) Operação atual



**Figura 2-3** Comparativo da área quando era lixão e como está hoje, aterro controlado. A) Situação em 2018, com disposição irregular de resíduos. B), C) e D) Imagens de 2019 após a contratação de empresa terceirizada para gerir e operacionalizar o local.

### 2.3 Geologia

O município de Caldas Novas está inserido no contexto geológico da Província Tocantins (Almeida et al. 1977). Esse orógeno é limitado à oeste pelo Cráton Amazônico, onde estão as Faixas dobradas Araguaia e Paraguai, a leste, pelo Cráton São Francisco, onde está estabelecida a Faixa Brasília, e ao norte e ao sul, é coberto por depósitos fanerozóicos das bacias do Parnaíba e do Paraná, respectivamente.

A Faixa Brasília, cinturão móvel, depositado e deformado sobre um embasamento constituído por terrenos granito gnáissicos paleoproterozóicos, afetado por um sistema de dobramentos neoproterozóicos, é dividida em Zona Interna e Zona Externa. Entre as rochas que constituem a denominada Zona Interna estão as rochas do Grupo Araxá, que é a unidade geológica presente na área do aterro controlado.

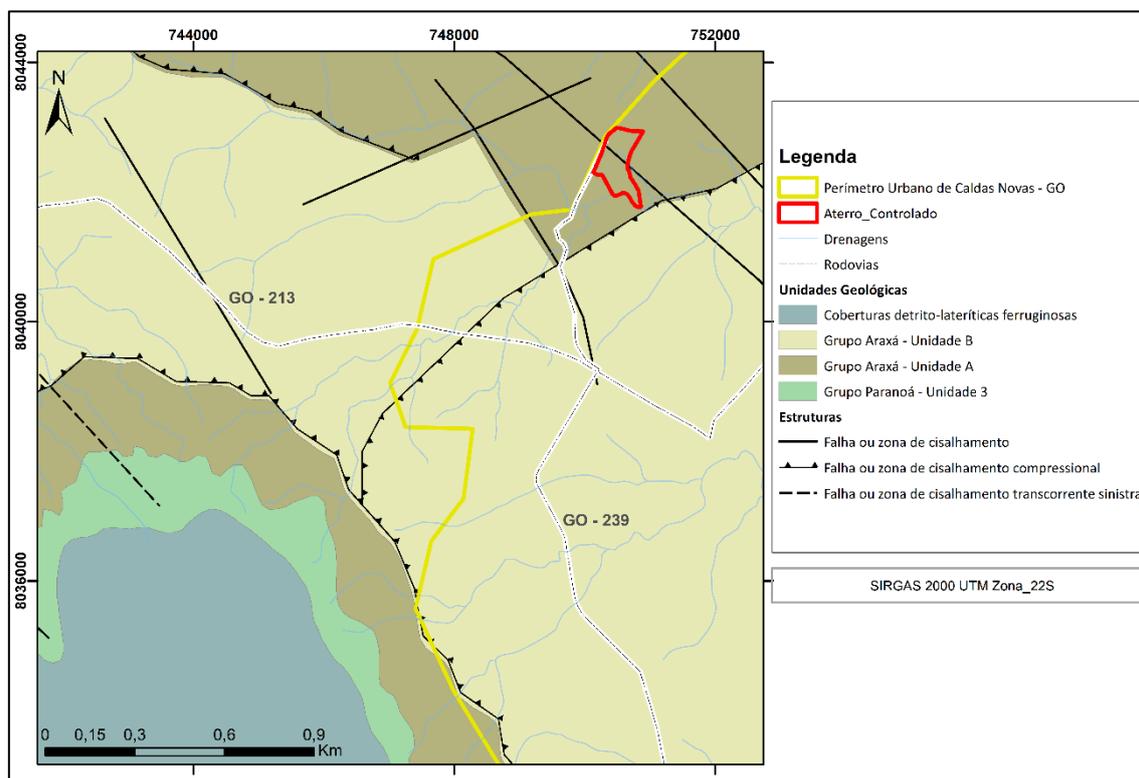
O Grupo Araxá (Campos et al, 2009) é constituído de monótonas sequências plataformais metamorfasadas na fácies xisto verde, com muscovita-quartzo-biotita xistos, muscovita-biotita xistos, muscovita-biotita-granada xistos, formados essencialmente por metassedimentos e posicionado no Proterozóico Médio.

Na área do aterro controlado (Figura 2-4), o Grupo Araxá é representado por sua Unidade A - composta por Granada-quartzo-biotita xisto feldspático, quartzitos e quartzitos com lentes de metalcalcário e talco. Já na área urbana do município, próxima ao local do estudo, a planície é formada pela Unidade B – composta por Muscovita-quartzo xisto, com intercalações de sericita quartzito e subordinadamente granada biotita xisto

O Grupo Paranoá aparece apenas do Domo de Caldas Novas, constituído por metarenitos de cores cinza-clara a rósea e granulação fina a média. Exibem estruturas sedimentares primárias, tipo laminações paralelas, estratificações cruzadas de baixo ângulo e acamamento gradacional (VALENTE, 1987).

As relações de contato do Grupo Araxá com as demais unidades se realizam, na maioria das vezes, por tectônica, através de zonas de cisalhamento em regime contracional ou transcorrente compressional, com marcante milonitização, ao longo das

quais se desenvolveram ações hidrotermais. Já o contato entre as subunidades ocorre de forma transicional e/ou por imbricação tectônica, como os desenvolvidos entre as unidades A e B, que se encontram empurradas para leste e se alternam tectonicamente entre si.



**Figura 2-4** Mapa Geológico de parte do município de Caldas Novas, com ênfase para a área do Aterro Controlado. Fonte: Moreira, et al. 2008.

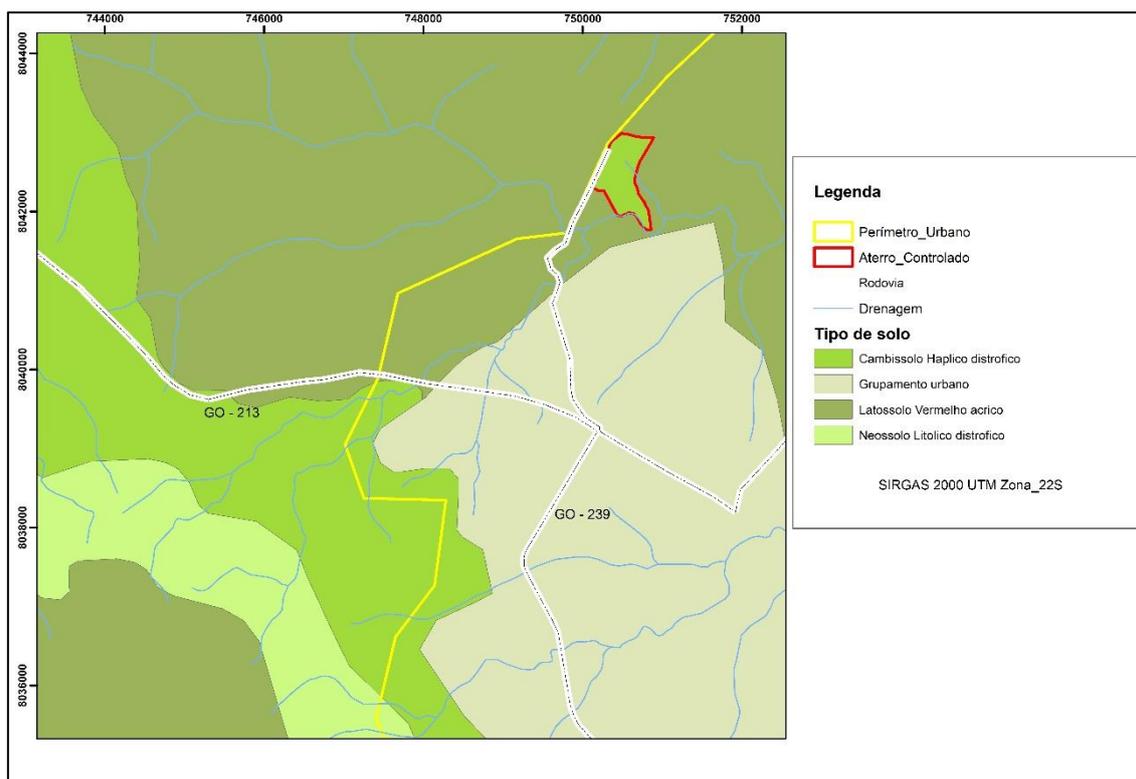
## 2.4 Pedologia

No município de Caldas Novas, [Figura 2-5](#), predominam 3 (três) diferentes tipos de solos: Cambissolo Háplico Distrófico, Latossolo Vermelho Ácrico e Neossolo Litólico Distrófico. Na área do Aterro Controlado ocorre o Cambissolo, identificado por mapeamento de campo.

Os Cambissolos apresentam seqüência de horizontes do tipo A ou hístico<sup>5</sup>, Bi, C, com moderada diferenciação entre eles ([EMBRAPA 1999](#)). Compreendem solos minerais, com horizonte A ou hístico de espessura menor que 40 cm e horizonte B incipiente subjacente ao horizonte A de qualquer tipo, excluído o chernozêmico (quando a argila do horizonte Bi for de atividade alta). São solos pouco evoluídos, geralmente pedregosos e, devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas características são bastante variáveis, mas em geral caracterizam-se por serem bem drenados, pouco

profundos ou rasos, com teores de silte elevados, e constituídos por mais de 4% de minerais primários e mais de 5% de fragmentos de rocha semi-intemperizada. Devido

a seu desenvolvimento ainda incipiente, as características destes solos estão em consonância com o material de origem (ALMEIDA *et al*, 2006).



**Figura 2-5** Mapa de Solos de parte do município de Caldas Novas, com ênfase para a Área do Aterro Controlado. Fonte: Sousa, 2018 modificado.

## 2.5 Hidrogeologia

No Brasil existem dez províncias hidrogeológicas (DNPM/CPRM, 1981), sendo Goiás a unidade da federação que apresenta o maior número de províncias: Escudo Central, São Francisco, Paraná, Centro-Oeste e Parnaíba, Escudo Oriental, sendo esta última onde o município de Caldas Novas – GO está inserido.

Segundo Almeida, *et al* (2006), as províncias hidrogeológicas podem ser classificadas segundo grupos, domínios e sistemas aquíferos. Os grupos são formados com base na integração de dados geológicos, climáticos, geomorfológicos e pedológicos; os domínios são divididos em função do tipo de porosidade predominante e os Sistemas, em virtude da disponibilidade de informações sobre as variações litológicas e estruturais dos conjuntos litoestratigráficos associados.

Para a região de estudo, é possível identificar 2 (duas) classificações de aquíferos profundo e um freático (Tabela 2-1). A Figura 2-6 contextualiza na região a distribuição dos aquíferos.

**Tabela 2-1** Proposta de classificação dos aquíferos subterrâneos do estado de Goiás (ALMEIDA, 2006).

GRUPO	DOMÍNIO	SISTEMA AQUIFERO	SÍMBOLO	LITOLOGIA / SOLO PREDOMINANTE
Freático	Intergranular	Freático II	F <sub>2</sub>	Latossolos

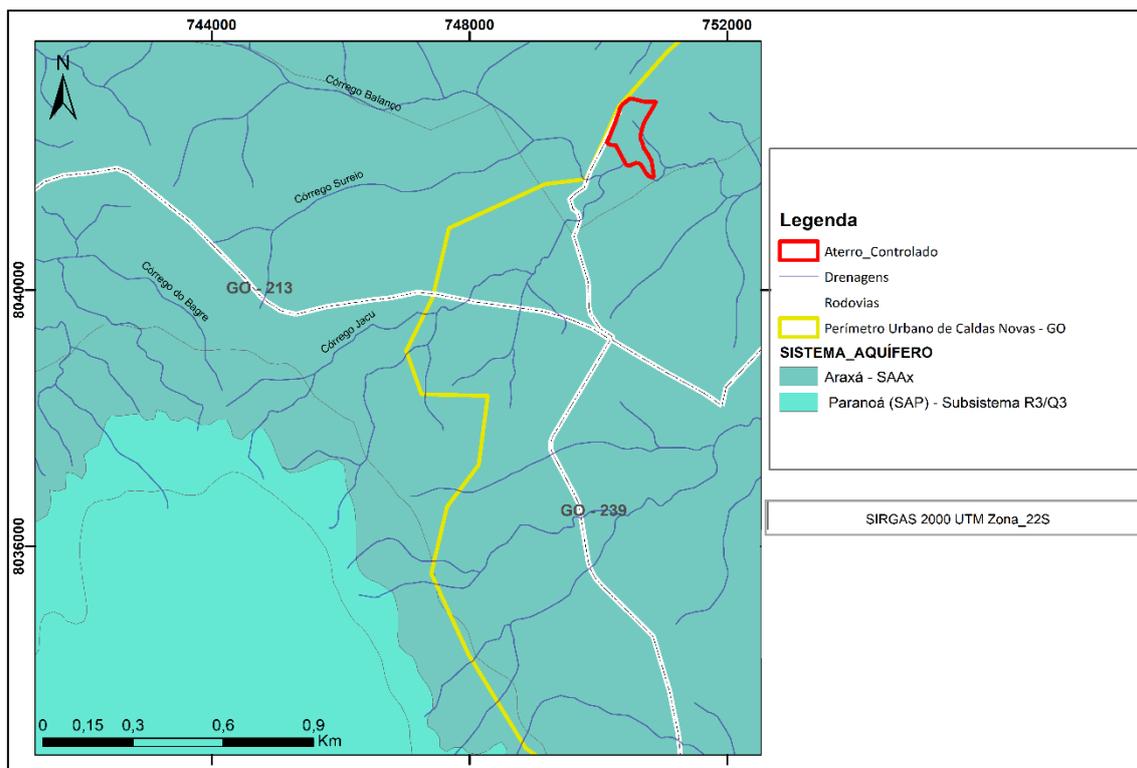
<b>Profundo</b>	Fraturado	Araxá	SAAx	Xistos
		Paranoá	SAPr3q3	Metarritmitos, Quartzitos

O Sistema Aquífero Freático II – F<sub>2</sub>, pertencente ao Grupo Freático, com domínio de porosidade intergranular, abrange todas as porções cobertas por latossolos, bem como o topo da Serra de Caldas (Fig. 2-5). Esta classe de solo apresenta uma feição marcante relacionada à presença de estruturas do tipo granular ou grumosa que faz com que todos os latossolos independente de sua textura (muito argilosa, argilosa, franca, siltosa, etc.) resultem em materiais com funcionamento hídrico similar, de forma geral, de alta condutividade hidráulica e elevada porosidade efetiva (não inferior a 8%). Os valores da condutividade hidráulica variam, na superfície, na ordem de grandeza de 10<sup>-7</sup> a 10<sup>-4</sup> m/s, e em profundidade, de 10<sup>-9</sup> a 10<sup>-4</sup> m/s, sendo os valores médios de 3,3 x 10<sup>-5</sup> m/s em superfície, e 4,0 x 10<sup>-6</sup> m/s em profundidade (ALMEIDA, *et al.*, 2006).

Os domínios fraturados, pertencentes ao Grupo de aquíferos profundos, são constituídos por rochas magmáticas e metamórficas em diferentes graus, onde os processos tectônicos rúpteis foram responsáveis pela abertura de um retículo de fraturas ou fissuras que compõem o espaço eventualmente preenchido pela água. O potencial destes sistemas é vinculado à abertura, densidade e interconexão das fraturas. É nesse sistema que se encontram os dois importantes aquíferos de Caldas Novas, o Araxá e o Paranoá.

O Sistema Aquífero Araxá (SAAx) compreende o conjunto litológico do Grupo Araxá, associado às Sequências Vulcano-Sedimentares situadas ao sul da Sintaxe dos Pirineus, juntamente com as supracrustais dos arcos de ilha situadas no sudeste do estado e ao Grupo Cuiabá. Esta associação de unidades e tipos petrográficos é justificada em função da similaridade reológico-estrutural que estes materiais apresentam, e por se tratar predominantemente de micaxistos, com menor contribuição de quartzitos, anfibolitos e rochas ultramáficas.

Em função da pequena porosidade observada nos tipos litológicos metapelíticos, que predominam e do baixo ângulo de mergulho da foliação, este sistema possui baixa vocação hidrogeológica. Se consideradas as vazões anômalas em pontos isolados a média eleva-se, entretanto os valores médios são condicionados pela presença de poços de vazões superiores associados a lentes de mármore que ocorrem de forma restrita na área de distribuição do Grupo Araxá ou um sistema de fraturas abertas e, portanto, mais produtivas. Já, uma favorável deste sistema está relacionada aos quartzitos e quartzo xistos, os quais resultam em aquíferos com maior transmissividade e coeficiente de armazenamento (ALMEIDA, *et al.*, 2006).



**Figura 2-6** Mapa dos Sistemas Aquíferos de parte do município de Caldas Novas, com ênfase para a Área do Aterro Controlado. Fonte: Almeida, et al. 2006.

O Sistema Aquífero Paranoá (SAP) corresponde aos litotipos do Grupo Paranoá. A subdivisão segue os critérios propostos por [Campos & Freitas-Silva \(1998\)](#), que utilizam os códigos propostos para a divisão estratigráfica do Grupo Paranoá e sua relação com as propriedades hidrogeológicas homogêneas. Os aquíferos são denominados: Subsistema R1/Q1 (Metarritmito/Quartzito), Subsistema S/A (Metassiltito/Ardósia), Subsistema A (Ardósia), Subsistema R3/Q3 (Metarritmito/Quartzito), Subsistema R4 (Metarritmito argiloso) e Subsistema PPC (Psamo-Pelito-Carbonatado), sendo o subsistema R3Q3 é onde está o aterro controlado de Caldas Novas.

Subsistema R3/Q3 (SAPR3Q3) inclui três unidades litológicas, o que se justifica devido aos tipos rochosos, predominantemente quartzíticos, apresentarem características hidrogeológicas muito semelhantes, o que é refletido nos parâmetros hidrodinâmicos, distribuição estatística de médias de vazões, vazões específicas e condições construtivas dos poços. Em função do comportamento rúptil dos quartzitos, há uma grande distribuição, abertura e interconexão das discontinuidades por todo o maciço rochoso, que favorece a manutenção da abertura das fraturas em maiores profundidades. Desta forma os poços que interceptam litologias destas unidades, apresentam um grande número de entradas de água, com fraturas dispersas por toda a seção perfurada. Este subsistema apresenta importância hidrogeológica relativa local

relevante devido às altas vazões e seus parâmetros hidrodinâmicos como condutividade hidráulica média de  $3 \times 10^{-7}$  m/s; transmissividade média de  $3 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s e coeficiente de armazenamento médio de 0,3 (ALMEIDA, *et al.*, 2006).

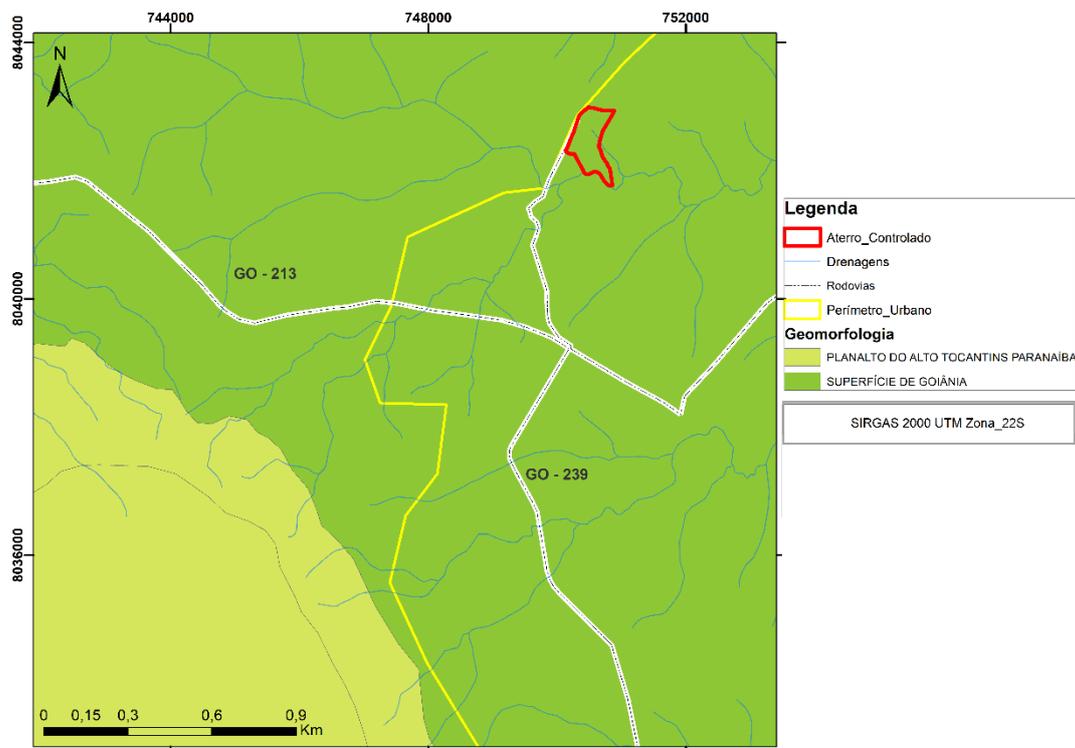
## 2.6 Geomorfologia

A compartimentação geomorfológica do Estado de Goiás se dá pelo agrupamento de feições que apresentam entre si filiações genéticas comuns.

A cidade de Caldas Novas compõe a região do Planalto Central Goiano, dividindo-se entre as unidades Planalto do Alto Tocantins – Paranaíba e a Superfície de Goiânia. O primeiro, faz parte do Domínio dos Planaltos de Estruturas Dobradas, reproduz feições de relevo resultante da exumação de estruturas dobradas no decorrer de vários ciclos tectônicos, refletidos através de diferentes estilos estruturais que explicam as particularidades do relevo. A tectônica constitui um fator de grande influência no arranjo da drenagem. Esses fatores litoestruturais, aliados aos de origem climática, favoreceram a intensa dissecação, em geral muito forte, em relação aos demais compartimentos (LACERDA FILHO *et al.*, 1999).

Já a segunda, representa a parte mais baixa e erodida do relevo, com a presença de formas convexas, tabulares e aguçadas, predominando um planalto dissecado, de forma amplas e suaves, drenagem dendrítica, com vales abertos de fundo plano. No entorno da Serra da Caldas predominam as formas convexas, com alta densidade de drenagens, com vales fechados e encaixados (COSTA, 2008). As formações superficiais são de textura argilosa e arenosa.

É nesse contexto geomorfológico denominado Superfície de Goiânia, que se encontra a área de estudo (Figura 2-7).



**Figura 2-7** Unidades Geomorfológicas do Estado de Goiás, com ênfase para o município de Caldas Novas. Fonte: Latrubesse, et al. 2006

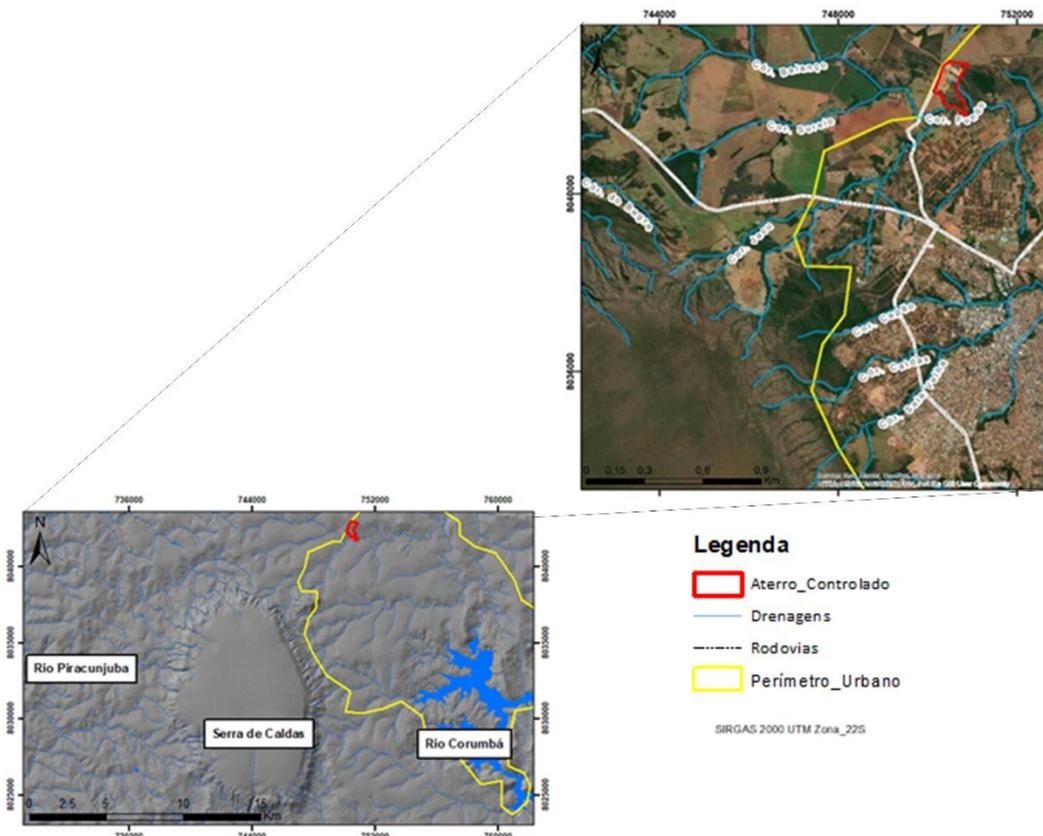
## 2.7 Hidrografia

Caldas Novas é parte integrante da bacia do Rio Paranaíba, sendo que os limites municipais são formados pelos principais rios da região: Rio Piracanjuba na porção noroeste; Ribeirão do Bagre a sudoeste; Rio do Peixe a nordeste e o Rio Corumbá, limitando o município de leste a sul e se constituindo no principal curso d'água da região (BIELLA, 2009).

A rede de drenagem é significativa, com presença de vales mais erodidos, em forma de “U” (vales abertos), onde o talvegue não é profundo.

Vários cursos d'água drenam o município, entre os quais se destacam o Ribeirão Pirapitinga, afluente da margem direita do Rio Corumbá, que corta a porção centro norte do município e é a fonte de abastecimento de água da cidade, captada pelo sistema público e o Ribeirão Caldas que corta toda a área urbana de Caldas Novas no sentido longitudinal. Vale ressaltar que a maior parte da bacia hidrográfica urbana nasce no Parque Estadual Serra de Caldas.

O curso d'água mais próximo da área de estudo é afluente do Ribeirão Pirapitinga, o Córrego Fundo, que margeia seu limite sul. Todo o contexto pode ser observado na [Figura 2-8](#).

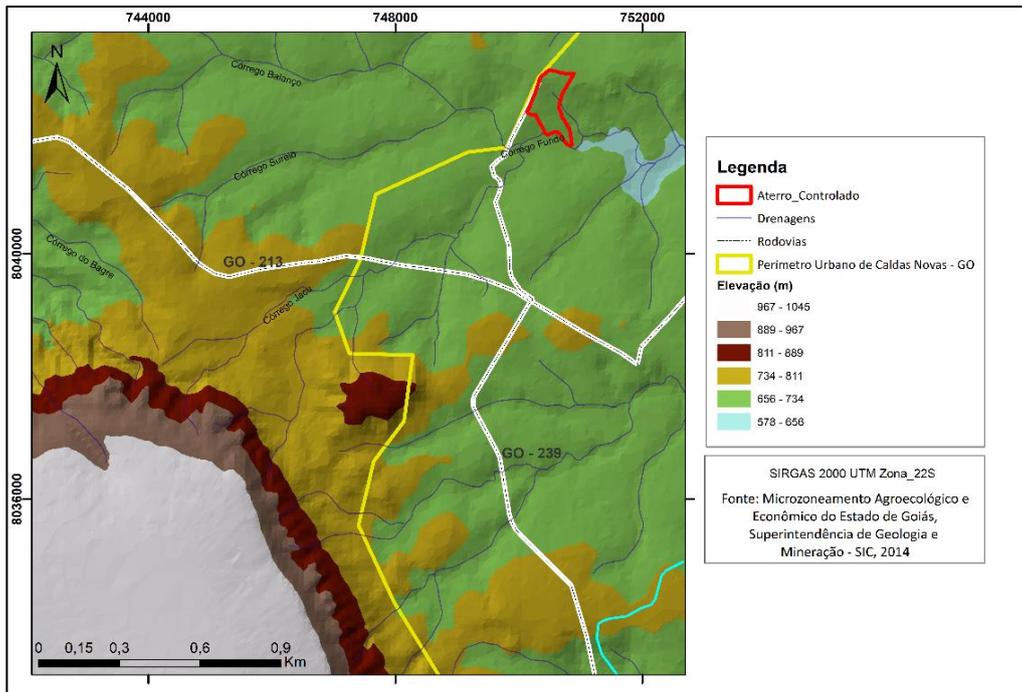


**Figura 2-8** Contextualização hidrográfica do município de Caldas Novas, com ênfase para a área do aterro controlado

## 2.8 Topografia

O relevo da região em torno de Serra da Caldas Novas é medianamente dissecado áreas com topos nivelados abaixo de 720 metros, de formas convexas. As vertentes apresentam baixa declividade e são pouco profundas.

O perfil topográfico da área do Aterro Controlado de Caldas Novas - GO, no sentido NORTE -SUL, com visada para nordeste, [Figura 2-9](#), evidencia o declive sentido sul, em torno de 6%, onde encontra-se o córrego do Fundo, afluente do Ribeirão Pirapitinga. À norte, encontra-se um alto topográfico, com um desnível de 64 metros, sendo que a maior cota altimétrica dentro da área é de 729m e a menor, junto às margens do córrego é de 662m.



**Figura 2-9** Mapa de Elevação da região onde está inserido o aterro controlado de Caldas Novas. Fonte: SRTM – Folha SE.22-X-D.

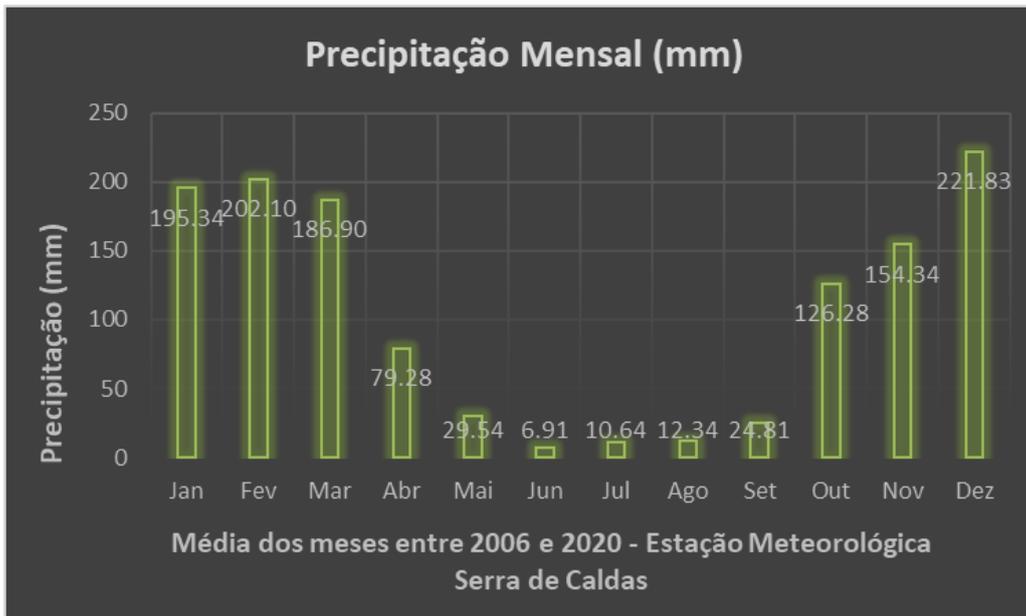
## 2.9 Clima

O clima da região, de acordo com a classificação de [Koppen \(1948\)](#), é do tipo Aw - Tropical, com inverno seco. Apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco).

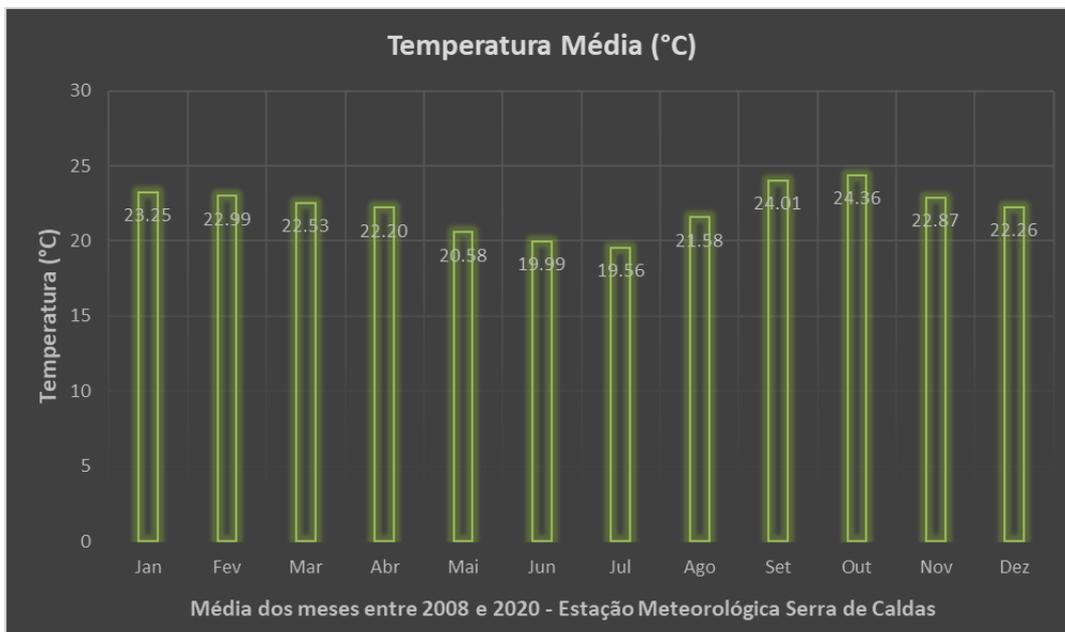
A pluviosidade da região é da ordem de 1.300 mm com as precipitações concentrando-se no período de outubro a março, e estação seca no período de abril a setembro. A primeira com altos índices pluviométricos (outubro a abril), onde ocorrem 95% das precipitações anuais e a outra com baixos índices pluviométricos (maio a setembro), a exemplo da [Figura 2-10](#), que mostra a pluviosidade ocorrida nos últimos 14 anos.

A temperatura média anual da região fica em torno de 22,2°C, havendo uma correspondência entre os valores médios mínimos (em torno de 20°C) nos meses secos e os valores médios máximos (24 à 28°C) nos meses chuvosos, conforme figura 2-13. A umidade relativa média é de 64,78%, medida ao longo dos últimos 12 anos, [Figura 2-11](#).

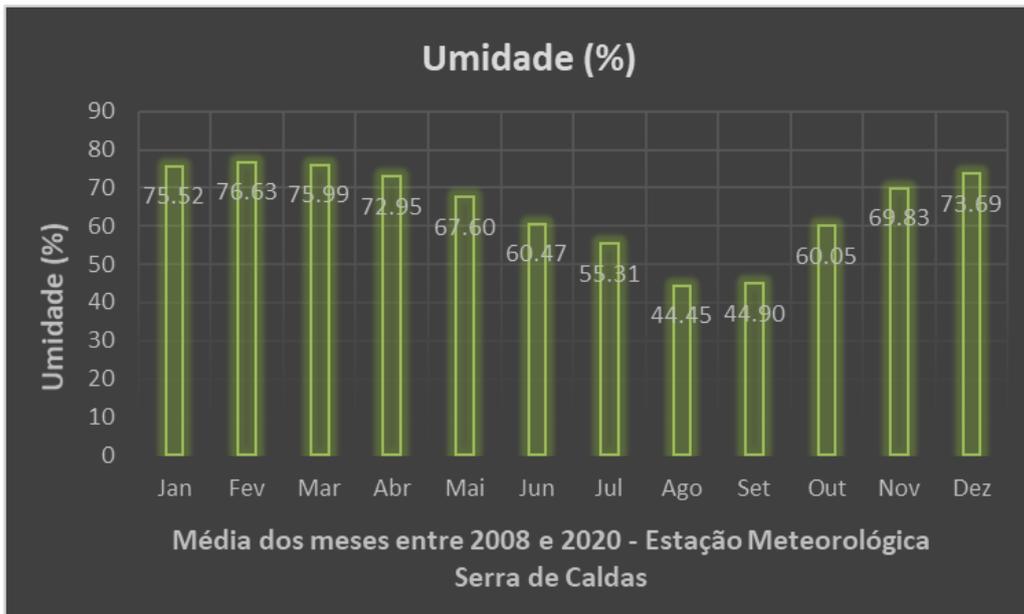
A umidade relativa do ar foi de 64,63% na média global da série histórica, sendo que os valores mais altos ficaram em torno de 73 a 75%, enquanto o mais baixo foi de 44,45% na média dos meses de agosto. Os valores médios mensais ao longo dos últimos 8 anos estão ilustrados na [Figura 2-12](#).



**Figura 2-10** Dados pluviométricos entre os anos de 2006 e 2020, obtidos na Estação Meteorológica Serra de Caldas (17°46'55,189"S / 48°41'14,132"W). Fonte: AMAT - Associação dos Mineradores de Águas Termais.



**Figura 2-11** Médias mensais da temperatura entre os anos de 2008 e 2020, obtidas na Estação Meteorológica Serra de Caldas (17°46'55,189"S / 48°41'14,132"W). Fonte: AMAT - Associação dos Mineradores de Águas Termais



**Figura 2-12** Médias mensais da umidade entre os anos de 2008 e 2020, obtidas na Estação Meteorológica Serra de Caldas (17°46'55,189"S / 48°41'14,132"W). Fonte: AMAT - Associação dos Mineradores de Águas Termais

Os dados foram fornecidos pela Associação de Mineradores de Águas Termais de Caldas Novas – GO, no entanto, vale ressaltar que nas séries históricas apresentadas não constam o ano de 2013, momento em que a estação meteorológica apresentou defeito e não fez leituras periódicas e / ou confiáveis.

# CAPÍTULO 3

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 GROUND PENETRATING RADAR

O radar de penetração no solo (GPR) é um equipamento para investigações com seu uso em rápido crescimento e que tem visto relevante progresso no desenvolvimento da teoria, técnica, tecnologia e variedade de aplicações nos últimos 15-20 anos (JOL, 2009). Um apanhado histórico é descrito por Annan (2002).

Segundo Annan (2005), é o método geofísico que possui o mais abrangente conjunto de aplicações, o que o leva a uma ampla gama de escalas espaciais e simultaneamente à diversidade de configurações de instrumentos.

Kearey *et al* (2009) apontam o mapeamento geológico, o imageamento do solo raso e de estruturas de rocha em alta resolução, a localização de canais enterrados, o mapeamento do lençol freático, a arqueologia, a localização de paredes e cavidades enterradas e as investigações forenses como algumas das aplicações do GPR. Telford *et. al.* (1990) ressaltam a utilização de métodos eletromagnéticos no mapeamento de áreas contaminadas.

O incremento na diversidade de aplicações de métodos geofísicos, particularmente no que diz respeito a investigações de áreas contaminadas, levou ao desenvolvimento do tema "geofísica ambiental" (Greenhouse, 1991; Steeples, 1991), que foi definido Reynolds (2011) como: "A aplicação de métodos geofísicos para a investigação rasa de fenômenos bio – físico – químicos que podem oferecer implicações para a gestão do meio ambiente local".

#### 3.1.1 Conceito e Princípios Básicos

O Radar de Penetração no Solo é um método eletromagnético que utiliza ondas de rádio em frequências muito altas (normalmente entre 10 à 2500MHz) para imagear a subsuperfície em alta resolução. Embora análogo aos métodos sísmicos, a propagação de ondas através de um meio é controlada por suas propriedades elétricas em altas frequências, (KEAREY *et al*, 2009).

O sistema de radar compreende um gerador de sinal, um ou mais transmissores e antenas receptoras (dependendo do sistema e método de implantação), e um console de controle para gerenciar o sinal gerado e a gravação dos dados (REYNOLDS, 2011).

Segundo Jol (2009), a forma mais comum de medições GPR implanta um transmissor e um receptor em uma geometria fixa, que são movidos sobre a superfície para detectar reflexos de recursos de subsuperfície.

Os fundamentos do GPR estão na Teoria Eletromagnética e são as Equações matemáticas de Maxwell que descrevem a física dos Campos Eletromagnéticos (EM), **Eq. 3-1 e Eq. 3-2**.

Na maioria dos materiais geológicos, verifica-se que sempre há alguma dependência da frequência para as propriedades elétricas, enquanto as propriedades magnéticas tendem a ser menos importantes (ANNAN, 1996). A atenuação do sinal do GPR é invariavelmente transmitida nas propriedades elétricas e magnéticas em variadas escalas de heterogeneidade. Em baixas escalas de heterogeneidade, tem-se a ocorrência de respostas fracas e indetectáveis do sinal, isso porque a energia do campo EM é dispersada em várias direções ao passar pela heterogeneidade de um meio (CAVALCANTI, 2013). Isso deve-se ao fato de a permeabilidade magnética relativa ser próxima da unidade para a maioria das rochas, exceto as magnéticas (KEAREY, 2009).

Na primeira equação, Lei de Ampère, o campo magnético  $\vec{H}$  é produzido por correntes elétricas, conforme **Eq. 3-1**.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Eq. 3-1}$$

$\vec{J}$  = densidade de corrente de condução em ampère/metro quadrado (A/m<sup>2</sup>)

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  = variação da corrente de deslocamento

Na segunda equação, Lei de Faraday, o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) é produzido pela variação do campo indução magnética ( $\vec{B}$ ) em relação ao tempo, vide **Eq. 2**.

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Eq. 3-2}$$

No entanto, as relações constitutivas (**Eq. 3-3, 3-4, 3-5**) fornecem uma descrição macroscópica de como elétrons, átomos e moléculas respondem em massa à aplicação de um campo EM (JOL, 2009), caracterizando o material por onde esses campos atua. A combinação dessas relações constitutivas proporciona a descrição adequada do sinal.

A primeira relação constitutiva do meio é conhecida como Lei de Ohm, que relaciona a densidade de corrente de condução  $\vec{J}$  ao campo elétrico  $\vec{E}$ , **Eq. 3-3**. Nos materiais geológicos simples essa relação é praticamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica ( $\sigma$ ).

A segunda relação constitutiva associa diretamente o campo elétrico  $\vec{E}$  à corrente de deslocamento ou polarização  $\vec{D}$ , **Eq. 3-4.**, e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material ( $\epsilon$ ).

A terceira relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo magnético  $\vec{H}$  com o campo indução magnética  $\vec{B}$ , **Eq. 3-5.**, e a constante de proporcionalidade é a permeabilidade magnética ( $\mu$ ).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Eq. 3-3}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{Eq. 3-4}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Eq. 3-5}$$

$\sigma$  (S/m - Siemens por metro) = Condutividade Elétrica caracteriza a capacidade de um material conduzir corrente quando na presença um campo elétrico.

$\epsilon$  (F/m - Faraday por metro) = Permissividade dielétrica é a habilidade de polarização em resposta a um campo elétrico aplicado.

$\mu$  (H/m - Henry por metro) = Permeabilidade Magnética descreve o 'valor' do campo magnético no interior do material.

No método GPR, tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas EM, respectivamente (ANNAN, 1996). Em rochas de alta resistividade ( $>10^2$  ohm m), a velocidade de propagação do pulso é principalmente controlada pela permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ). A permissividade dielétrica tem lugar nesses maus condutores e isolantes, que não têm portadores livres. Já a água tem uma constante dielétrica de 80, enquanto na maior parte dos materiais geológicos secos a constante dielétrica está num intervalo de 4-8, conseqüentemente, o conteúdo de água nos materiais exerce forte influência sobre a propagação de pulso de radar (KEAREY, 2009).

Segundo Jol (2009), para GPR, a permissividade dielétrica é uma mensuração muito importante e na maioria das vezes, o termo de permissividade relativa  $\epsilon_r$  (ou constante dielétrica "k") é usado e definido pela **Eq. 3-6**:

$$\epsilon_r = k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{Eq. 3-6}$$

$\epsilon$  = permissividade dielétrica do material (F/m)

A permissividade no vácuo é estimada em  $\epsilon_0 = 8,89.10^{-12}$  F/m.

Annan (1996) sugere que para estudos de radiação na superfície da Terra seja adotado que:

- O meio é isotrópico, horizontalmente estratificado, com extensão infinita;
- $\epsilon$  e  $\mu$  são constantes e independentes do tempo, sendo  $\mu = \mu_0$  para a maioria das rochas, onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m é a permeabilidade magnética do espaço livre.

### 3.1.2 Coeficiente de Reflexão

As propriedades eletromagnéticas dos materiais são controladas principalmente pela composição e quantidade de água em face à velocidade de propagação de ondas de rádio e a atenuação de ondas eletromagnéticas. Alguns materiais permitem com maior facilidade a transmissão das ondas, outros menos, são opacos à transmissão, absorvendo ou refletindo às ondas.

Reynolds (2001) explica que, quanto maior o contraste, maior será a quantidade de ondas de rádio e energia refletida. A proporção de energia refletida, dada pelo *coeficiente de reflexão (Re)*, é determinada pelo contraste entre as velocidades de ondas de rádio, e, mais fundamentalmente, pelo contraste nas constantes dielétricas dos meios adjacentes.

A amplitude do coeficiente de reflexão é dada pela **Eq. 3-7**:

$$Re = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad \text{Eq. 3-7}$$

$V_1$  e  $V_2$ : velocidades de ondas de rádio nas camadas 1 e 2, sendo  $V_1 > V_2$

Para incidência normal (plano de incidência perpendicular à superfície) e lembrando que, nas frequências de operação do GPR predominam as correntes de deslocamento, a amplitude do coeficiente de reflexão ( $Re$ ), pode ser escrito como, **Eq. 3-8**:

$$Re = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad \text{Eq. 3-8}$$

$\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$ : constantes dielétricas relativas ( $\epsilon_r$ ) das camadas (aplicável para incidência em ângulos retos) para um refletor plano. Normalmente,  $\epsilon$  aumenta com a profundidade, então geralmente  $\epsilon_1 < \epsilon_2$ .

### 3.1.3 Profundidade de Penetração

Jol (2009) demonstra que a atenuação em materiais naturais é uma combinação de perdas elétricas e perda de espalhamento e, portanto, a profundidade de investigação e a resolução GPR variam de acordo com a frequência da antena, quanto mais alta a frequência, menor a penetração do sinal e maior resolução vertical, e vice-versa.

A perda de energia ocorre como consequência da reflexão / transmissão, por perdas sobre cada interface que ocorrem cada vez que as ondas de rádio passam por uma delas e pelo espalhamento geométrico caso haja objetos com a mesma dimensão da onda de rádio (REYNOLDS, 2011).

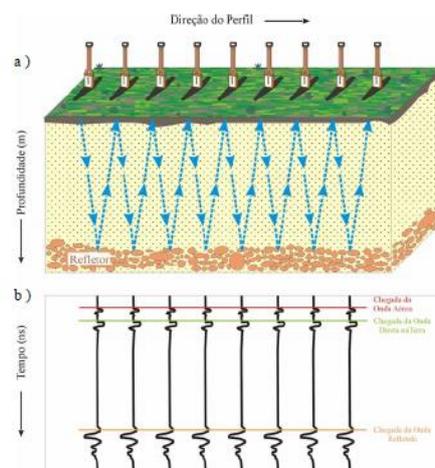
### 3.1.4 Técnicas de Aquisição de dados

As técnicas de aquisição de dados são divididas em três: perfis de reflexão com afastamento constante (*Common Offset*) e sondagens de velocidade (*Common Mid Point – CMP*, *Wide-Angle Reflection and Refraction - WARR*) e transiluminação.

- **Perfil de Reflexão com afastamento constante**

As antenas transmissoras e receptoras são mantidas a um espaçamento fixo e são deslocadas simultaneamente pelo perfil. Os tempos de viagem são medidos para refletores de radar.

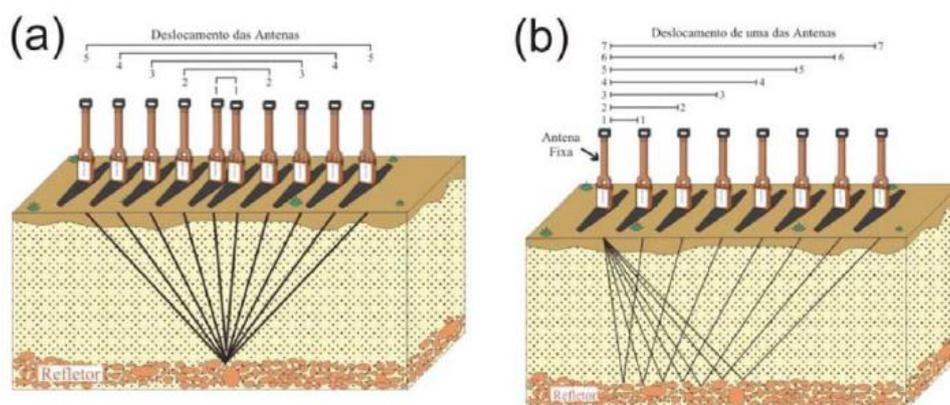
O resultado é uma imagem na qual são exibidos no eixo horizontal a distância que a antena percorreu e no eixo vertical é mostrado o tempo duplo do sinal GPR (ida e volta), mostrando as variações das propriedades dielétricas da superfície (Figura 3-1; BORGES, 2002).



**Figura 3-1** a) Procedimento de Levantamento Common Offset com espaçamento fixo. b) Traços GPR mostrando a chegada da onda aérea, da onda na terra e da onda refletida no substrato em subsuperfície (BORGES, 2002).

- **Sondagem de Velocidade**

É utilizada para estimar a velocidade de propagação da onda de radar em função do tempo duplo dos perfis de reflexão. Na técnica CMP, as antenas são deslocadas em sentidos opostos em relação a um ponto fixo central (Figura 3-2a). Na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é afastada (Figura 3-2b).



**Figura 3-2** Esquema de sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b)WARR. (BORGES, 2007)

Na transiluminação, as antenas, transmissora e receptora, são colocadas em um poço. As imagens através da energia de propagação são produzidas paralelamente ao deslocamento das antenas.

Os dados obtidos com o GPR foram processados no software ReflexW da Sandmeier Geophysical Research.

### **3.2 ELETORRESISTIVIDADE**

As técnicas de aquisição de dados por resistividade elétrica foram desenvolvidas no início de 1900, mais precisamente, têm sua origem no ano de 1920 pela aplicação do método pelos irmãos Schlumberger (LOKE, 2004). Porém, tornaram-se muito mais amplamente utilizados a partir da década de 1970, devido principalmente à disponibilidade de computadores para o processamento e análise dos dados (REYNOLDS, 2011).

Os levantamentos de resistividade elétrica têm uso diversificado e aplicam-se às áreas de exploração mineral, geotecnia, estudos ambientais, especialmente a caracterização de locais com contaminação e podem ser encontrados em Morais *et al.* (2007), Moreira *et al.* (2013), Soares de Sá e Elis (2017), Rangel *et al.* (2017), Olajojo *et al.* (2017), Olabode *et al.* (2020). Para áreas contaminadas, em especial, tem a capacidade de apresentar as mudanças nos valores de resistividade elétrica dos materiais subterrâneos, o que a torna potencial para estudos de poluição ambiental (KAYA *et al.*, 2007).

A eletrorresistividade foi usada nas últimas décadas para detectar vazamentos e monitorar a evolução das conseqüentes plumas de contaminação (TSO *et al.*, 2020).

Cavalcanti *et al* (2001) mostraram que este método é uma forma otimizada para efetuar a monitorização e proteger a qualidade dos recursos hídricos, em áreas de elevados riscos de poluição subterrânea.

Há uma quantidade substancial de trabalhos dedicados a caracterizar pluma de contaminação utilizando - se eletrorresistividade como em Cavalcanti *et al.* (2002), Pomposiello *et al.* (2004), Olofsson *et al.* (2006), Moreira *et al* (2007), Bacellar *et al.*(2010), Canata *et al.* (2018), Koda *et al.* (2017).

### 3.2.1 Conceito e Princípios Básicos

A eletrorresistividade é um método elétrico que consiste em aferir a diferença de potencial elétrico tanto para campos elétricos induzidos, fazendo uso de corrente artificial contínua a ser aplicada no solo, como dos campos elétricos naturais existentes na crosta terrestre (TELFORD, 1990).

O método é utilizado para investigar discontinuidades horizontais e verticais através de suas propriedades elétricas e também detectar corpos tridimensionais com condutividade elétrica anômala (resistividade).

A resistividade elétrica mede o quanto um material se opõe à passagem de uma corrente elétrica devido às diversas características, dentre elas temperatura em que se encontra o material, composição do condutor, comprimento do condutor e área da seção transversal.

Matematicamente, e conforme descrito em (Telford *et al.*, 1990; Kearey *et al.*, 2009; Reynolds, 2011), considera - se um cilindro condutor de resistência R, comprimento L e seção transversal A, Figura 3-3, podemos admitir a equação da resistividade consiste em, **Eq. 3-9**:

$$\rho = R \times \frac{A}{L} \quad \text{(Eq. 3-9)}$$

$\rho$  = resistividade

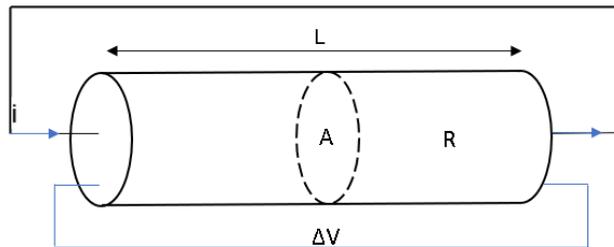
$L$  = comprimento do material

$R$  = resistência do material – resistividade real (constante de proporcionalidade)

$A$  = área da seção transversal

Da equação, pode - se observar que a resistividade ( $\rho$ ) é diretamente proporcional à resistência do material ( $R$ ) e, inversamente proporcional ao seu comprimento. A unidade de medida de resistividade no Sistema Internacional (SI) é

ohm-metro (ohm.m), e seu oposto, a condutividade ( $\sigma$ ), tem como medida no SI o Siemens por metro ( $S/m = Sm^{-1} = ohm^{-1}m^{-1}$ ). Assim, o termo “mho” para o inverso de ohm às vezes pode ser encontrado.



**Figura 3-3** Esquema de sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b)WARR. (BORGES, 2007)

A resistividade é uma característica muito amplamente variável dentre as litologias e materiais, motivo pelo qual não é possível fazer uma identificação precisa baseando-se somente neste parâmetro. As rochas sedimentares em geral, são menos resistivas que as rochas ígneas e metamórficas, isso porque, via de regra, são mais porosas, conduzindo a maior parte da eletricidade por processos eletrolíticos. As rochas cristalinas também apresentam baixas resistências ao longo de fraturas e fissuras, acarretando que a porosidade é um importante fator na determinação da resistividade das rochas.

Embora a **Eq. 3-9** possa ser utilizada tanto para encontrar a resistividade advinda de meios com condução eletrônica quanto eletrolítica, no caso da última, [Archie \(1942\)](#) deduziu a resistividade efetiva (resistividade da rocha com água nos poros), de acordo com a fórmula empírica, **Eq. 3-10**:

$$\rho = a\phi^{-b}f^{-c}\rho_w \quad \text{Eq. 3-10}$$

Onde:

$\phi$  = porosidade

$f$  = fração de poros contendo água

$\rho_w$  = resistividade da água

$a, b, c$  = constantes empíricas

[Kearey \(2009\)](#) ressalta que a maior parte dos minerais formadores das rochas são isolantes, e por esse motivo a resistividade das rochas é, na maioria das vezes, controlada por suas características eletrolíticas, pela passagem de íons através da água presente nos poros. Admite-se então que, em geral, a resistividade das rochas é inversamente proporcional à quantidade de poros, diminuindo com seu aumento.

A resistividade dos materiais geológicos exhibe um dos maiores intervalos de todas as propriedades físicas, de  $1,6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  para prata nativa à  $10^{16} \Omega\text{m}$  para enxofre puro, (REYNOLDS, 2011). Há de se observar as variedades de resistências nas rochas, como por exemplo, rochas cristalinas que, apresentam resistência elevada em condições primárias, se muito fraturadas, tem seus novos espaços preenchidos com água e sais dissolvidos, o que aumenta sua condutividade.

### 3.2.2 Fluxo de corrente no solo

Considerando um material homogêneo, uma corrente  $I$  é passada através de um cilindro causando uma queda de potencial  $-\delta V$  entre as extremidades do elemento e que, segundo a Lei de Ohm,  $-\delta V = \delta RI$ , temos, substituindo na **Eq. 11** que:

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \frac{\rho I}{\delta A} \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{VA}{IL} \quad (\text{Eq. 3-11})$$

$\delta V$  = diferença de potencial através do resistor

$I$  = corrente através do resistor

$\delta V/\delta L$  (volt / m) = gradiente de potencial

A equação da resistividade (**Eq.3-12**) pode ainda ser escrita em função do campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e da densidade de corrente ( $\vec{J}$ )

$$\rho = \frac{\vec{E}}{\vec{J}} \quad (\text{Eq. 3-12})$$

Já considerando um único eletrodo de corrente na superfície em um meio de resistividade uniforme ( $\rho$ ), o circuito é finalizado com uma queda de corrente muito distante do eletrodo. A corrente distribui-se uniformemente de maneira radial a partir do eletrodo. À distância  $r$  do eletrodo, a casca tem uma área superficial  $2\pi r^2$ , apresentando, portanto, a densidade de corrente dada por, **Eq. 3-13**:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 3-13})$$

Utilizando-se da **Eq. 3-14**, o gradiente de potencial associado a esta corrente é:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\rho J = -\frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 3-14})$$

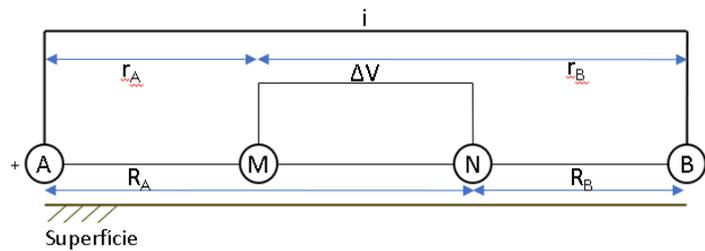
O potencial  $V_r$  à distância  $r$  é, então, obtido pela integração, cuja constante é zero, uma vez que  $V_r = 0$  quando  $r = \infty$ , segundo a **Eq. 3-15**.

$$V_r = \int \quad \partial V = \int \quad \frac{\rho I \partial r}{2\pi r^2} = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 3-15})$$

A equação acima permite calcular a diferença de potencial na superfície ou em qualquer ponto abaixo dela em um semi espaço homogêneo.

Porém, considerando-se que a queda de corrente, conforme [Figura 3-4](#), está a uma distância finita da fonte, o potencial  $V_C$  de um eletrodo interno C é a soma das contribuições de  $V_A$  e  $V_B$  da fonte da corrente A e B.

$$V_C = V_A + V_B$$



**Figura 3-4** Configuração geral dos eletrodos utilizada em medições de resistividade

Da equação acima, temos que, **Eq. 3-16**:

$$V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (\text{Eq. 3-16})$$

De modo similar, **Eq. 3-17**:

$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \quad (\text{Eq. 3-17})$$

Os potenciais absolutos são difíceis de monitorar e, assim, a diferença de potencial  $\Delta V$  entre os eletrodos C e D é medida conforme a **Eq. 3-18**:

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\} \quad (\text{Eq. 3-18})$$

Assim,

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left\{ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\}} \quad (\text{Eq. 3-19})$$

No entanto, a subsuperfície pode não ser uniforme, podendo ter variações na resistividade, conforme as variações de posições dos eletrodos. Por isso então, o valor calculado passa ser denominado **resistividade aparente ( $\rho_a$ )**, representando apenas a resistividade média do meio pelo qual a corrente elétrica passou. A **Eq. 3-19** acima é

o geral para o cálculo da resistividade aparente para qualquer configuração de eletrodos, devendo-se atentar para a uniformidade ou não do solo.

Ainda, considerando um terreno homogêneo, a profundidade de penetração se dá em função da separação dos eletrodos de corrente. Reynolds (2011) comenta que para, pelo menos 50% da corrente fluir através de uma interface e atingir uma profundidade  $z$ , faz-se necessário que os eletrodos estejam separados de uma distância de duas a três vezes maior que a profundidade que se deseja alcançar, o que implica nos levantamentos de campo visto a dificuldade em se estender centenas de metros de cabeamento. A Figura 3-5 ilustra o comportamento da corrente em relação a profundidade.

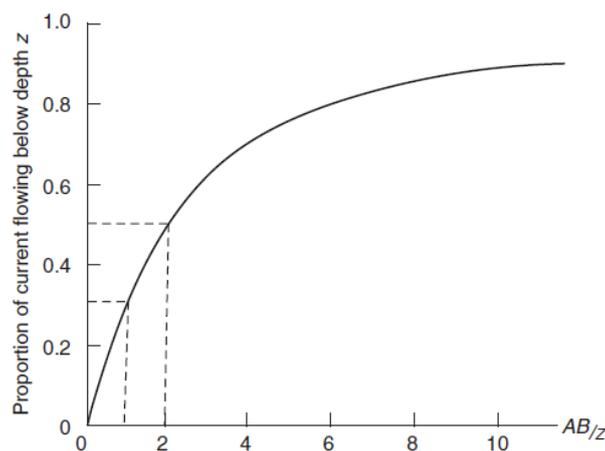


Figura 3-5 Configuração geral dos eletrodos utilizada em medições de resistividade

### 3.2.3 Arranjos de Eletrodos

Os levantamentos de eletrorresistividade podem ser compostos por diversos tipos de arranjos dos eletrodos, embora alguns sejam mais empregados. Neste trabalho serão descritos somente os arranjos que serão utilizados: Wenner, Wenner - Schlumberger, Dipolo – Dipolo, Polo - Dipolo.

Análises sobre os diferentes arranjos dos eletrodos podem ser encontradas em bibliografias como Gandolfo & Gallas (2007a), Gandolfo (2007b), Elis (2008), Xavier (2005).

Como no campo o que se mede não é um potencial, mas sim a diferença de potenciais entre dois eletrodos, então, da Eq. 18, podemos escrevê-la da seguinte forma, Eq. 3-20:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right\} \quad \text{Eq. 3-20}$$

Em que a resistividade  $\rho$  pode ser dada por, Eq. 3-21:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left\{ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right\}} \quad \text{Eq. 3-21}$$

Da equação anterior, define-se o fator geométrico k, **Eq. 3-22**:

$$k = \frac{2\pi}{\left\{ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right\}} \quad \text{Eq. 3-22}$$

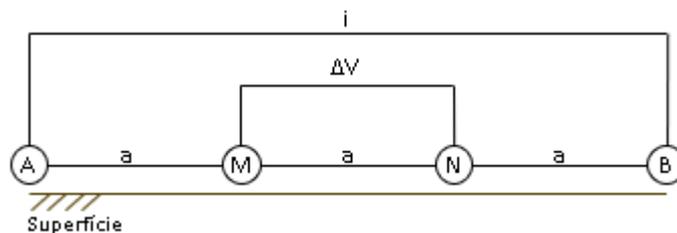
E, portanto:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Eq. 3-23}$$

Onde k tem dimensões de comprimento e depende somente da geometria do arranjo dos quatro eletrodos em superfície.

- **Wenner**

Neste arranjo, também conhecido como Wenner –  $\alpha$ , **Figura 3-6**, as distâncias entre os eletrodos de corrente e potencial são as mesmas durante toda a aquisição de dados e a profundidade mediana da investigação para esse arranjo é aproximadamente 0,5 vezes o espaçamento “a” usado.

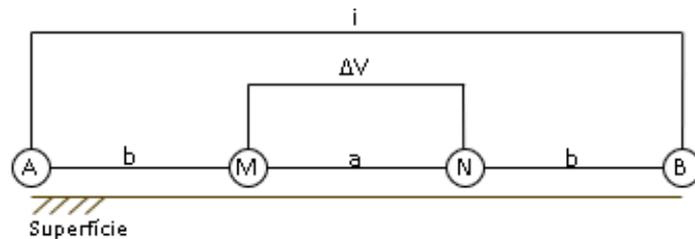


**Figura 3-6** Representação gráfica do Arranjo eletrônico Wenner Alfa, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão  $K = 2\pi a$ .

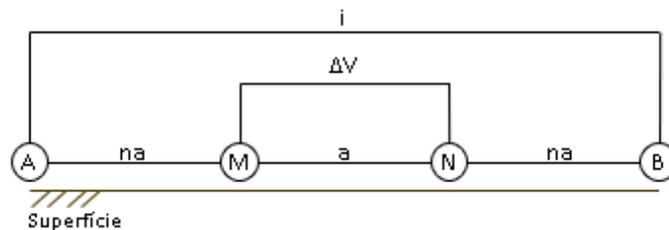
- **Wenner – Schlumberger**

No arranjo Schlumberger (**Figura 3-7**), os eletrodos são colocados em linha simetricamente a um ponto central, sendo que os eletrodos de potencial são colocados entre os de corrente, com distância diferente e sem qualquer relação com a distância entre os eletrodos de corrente, porém atendendo a condição de que  $a(MN) < (AB) / 2$ . É empregado principalmente em Sondagem Eléctricas Verticais.

Já, na variação Wenner-Schlumberger (**Figura 3-8**), os espaçamentos entre os eletrodos de corrente e de potencial são proporcionais.



**Figura 3-7** Representação gráfica do Arranjo eletródico Schlumberger, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão  $k = 2\pi b^2/a \times [1 - (a^2/(4b^2))]$ .



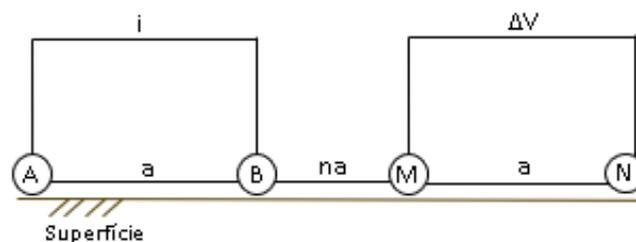
**Figura 3-8** Representação gráfica do Arranjo eletródico Wenner – Schlumberger, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão  $k = \pi n(n+1)a$

- **Dipolo – Dipolo**

Nas aquisições com arranjo dipolo – dipolo, os eletrodos são dispostos em uma linha em que os espaçamentos são definidos da seguinte forma:  $AB = MN = na$  (Figura 3-9).

As medidas são obtidas em várias profundidades  $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ , que são função de cada espaçamento feito ( $a$ ), e que gera uma seção de distribuição de resistividade aparente. As profundidades são obtidas a partir da interseção entre uma linha que se inicia no centro do par de eletrodos AB e se encontra a outra que sai do par de eletrodos MN, ambas com ângulo de  $45^\circ$ .

É utilizado em Sondagem Elétrica Vertical e em Caminhamento Elétrico.

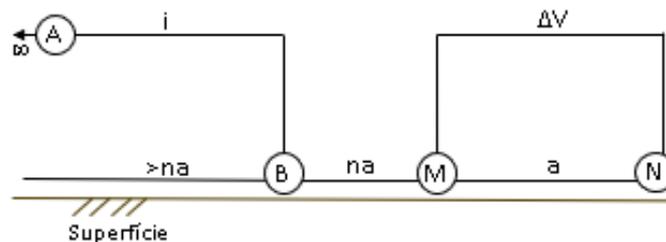


**Figura 3-9** Representação gráfica do Arranjo eletródico Dipolo – Dipolo, cujo Fator Geométrico pode ser obtido com a expressão  $k = 2\pi Ga$ , sendo que  $G = 1/[(1/n) - (2/(n+1)) + (1/(n+2))]$

- **Polo – Dipolo**

Também denominado arranjo tripolo (Gandolfo & Gallas, 2007a), e, consiste de três eletrodos móveis ao longo do levantamento, sendo um de corrente (B) e dois de potencial (M e N) com espaçamento  $a$ , e um de corrente (A), fixo a uma distância suficientemente grande (infinito), que corresponde a pelo menos 10 vezes a separação entre M e N para não interferir na aquisição dos dados, vide Figura 3-10.

Da mesma forma que no arranjo Dipolo – Dipolo, a profundidade cresce com o aumento do espaçamento entre os eletrodos.



**Figura 3-10** Representação Gráfica do Arranjo eletródico, Polo – Dipolo, cujo Fator geométrico pode ser obtido com a expressão  $k = 2\pi Ga$ , sendo que  $G = 1/[(1/n) - (1/(n+1))]$  =  $n(n+1)$

### 3.2.1 Levantamentos de Eletrorresistividade

Duas técnicas principais são empregadas em levantamentos de resistividade:

Sondagem Elétrica Vertical – SEV (vertical electrical sounding – VES): utilizada principalmente em estudos de camadas horizontais. Os eletrodos são mantidos com o mesmo espaçamento relativo enquanto o arranjo é expandido em torno de um ponto central fixo. Com isso, as tomadas de medidas são em profundidades cada vez maiores.

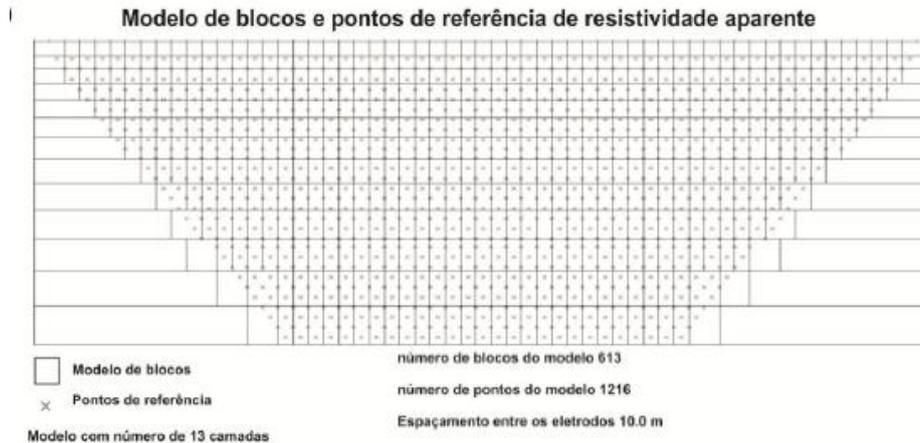
Caminhamento de Separação Constante (constant separation traversing – CST): é utilizado para determinar variações verticais de resistividade (KEAREY, 2009). Os eletrodos são mantidos a uma distância fixa um dos outros e o arranjo é todo deslocado ao longo de um perfil pré-estabelecido. Esse procedimento, ao final, fornece como produto uma seção de contorno de resistividade.

### 3.2.2 Interpretação dos dados

Após a aquisição de dados, as medidas de resistência são traduzidas a valores de resistividade aparente. Essas informações são tratadas por meio do software específico que transforma o posicionamento qualitativo fornecido pelas seções de pseudo-profundidade em dados quantitativos. Para interpretação dos valores de

resistividade aparente um modelo bidimensional com grande número de blocos retangulares é utilizado (Figura 3-11).

Zohdy (1989) produziu essa técnica para a inversão automática de curvas de sondagem de resistividade. Tal transformação corresponde a inversões matemáticas resultantes da aplicação do método de suavização de quadrados mínimos (Loke & Barker, 1996).



**Figura 3-11** Subdivisão da subsuperfície em blocos retangulares para interpretar dados de um imageamento bidimensional. (a) Modelo com algoritmo padrão e com número maior de blocos que o número de pontos de referência (datums) (adaptado de Loke,2001) Subdivisão da subsuperfície em blocos retangulares para interpretar dados.

De acordo com Reynolds (2011), o modelo inicial é usado para gerar uma curva teórica, que é comparada com os dados de campo. Um processo iterativo é então realizado para ajustar as resistividades do modelo, mantendo os limites fixos. Após cada iteração, a curva teórica é recalculada e comparada com os dados de campo, e o grau de desajuste é indicado pelo erro RMS percentual. O processo é repetido até que a diferença RMS entre as duas curvas alcance um valor mínimo ou aceitável.

## CAPÍTULO 4

### 4. ARTIGO 1

#### “ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ARRANJOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA PARA DELIMITAÇÃO DE PLUMA CONTAMINAÇÃO NO ATERRO CONTROLADO DE CALDAS NOVAS, GOIÁS, BRASIL”

**RESUMO.** A cidade de Caldas Novas, no Estado de Goiás, é um importante polo turístico relacionado aos balneários de águas termais. A contaminação dos aquíferos subterrâneos na região traria um inestimável prejuízo ambiental e social. Assim, nesse trabalho apresentam-se resultados de investigações de eletrorresistividade realizados ao longo de duas células de disposição de resíduos sólidos no Aterro Controlado do município. O trabalho objetiva verificar qual o arranjo eletródico evidencia com maior eficiência a base das células investigadas. Nas investigações foram utilizados os arranjos dipolo-dipolo, polo-dipolo e Wenner-Schlumberger com espaçamento entre os eletrodos de 5 metros. Todos os arranjos resultaram em modelos elétricos que apresentaram o maciço de resíduos com baixa resistividade, indicando forte influência de chorume. Entretanto, o arranjo polo-dipolo mostrou melhores resultados na definição da geometria das células. Os demais arranjos mostraram zonas de baixa resistividade muito abaixo das cavas, o que pode induzir a erros de interpretação.

**Palavras-chave:** Aterro Controlado de Caldas Novas; Chorume; Arranjo de Eletrodos; Geofísica Ambiental

**ABSTRACT.** The city of Caldas Novas is an important tourist center related to thermal water spas. Contamination of aquifers in the region would bring inestimable environmental and social damage to the municipality. Thus, this paper presents results of investigations of resistivity carried out along two solid waste disposal pits located in the controlled landfill of Caldas Novas. The work aims to verify which electrode array shows the more efficiently in investigated the contaminate plume. In the investigations, the dipole-dipole, pole-dipole and Wenner-Schlumberger arrays were used spacing between the electrodes of 5 meters. All arrangements resulted in electrical models that presented the waste with low resistivity, indicating a strong influence of leachate. However, the pole-dipole arrangement showed better results in defining the geometry of the pits. The other arrangements showed zones of low resistivity far below the pits, which can lead to misinterpretation.

**Keywords:** Caldas Novas Landfill; Leachate; Electrode Array; Environmental Geophysics

#### 4.1 INTRODUÇÃO

As políticas públicas e as discussões sobre desenvolvimento sustentável, resiliência e melhor qualidade de vida têm sido temas cada vez mais discutidos em escala global, a exemplo dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 aos seus países membros. Em seu 11º Objetivo, o conceito de Cidades e Comunidades Sustentáveis visa, entre outros objetivos, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, dando atenção especial à gestão de resíduos, desde a coleta até os resultados da destinação final (Nações Unidas, 2015). No entanto, nem todos os esforços legislativos atingem o desejado.

No Brasil, de acordo com o Diagnóstico de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (SNIS, 2019), existem 1.114 aterros, 580 aterros controlados e 621 aterros sanitários, o que demonstra a dificuldade financeira e gerencial em atender às normas e políticas públicas. Dos 2.315 locais de disposição informados, 25% correspondem a aterros controlados. Um total de 37 unidades estão localizadas na região Centro-Oeste do país (6% de todos os sites).

De acordo com a norma ABNT NBR 8849/1985, aterro controlado é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde e segurança pública, reduzindo os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte todos os dias ou conforme necessário. No entanto, todo o material é manejado sem tratamento, o que seria exigido em um aterro sanitário, de acordo com a norma ABNT NBR 8419/1992. De acordo com Liu e cols. (2016), embora o aterro sanitário seja uma forma admissível de disposição de resíduos, permanece como uma instalação ambientalmente impactante.

Os métodos geoeletricos são uma alternativa no diagnóstico de áreas contaminadas devido à sua velocidade de execução e custo reduzido quando comparados aos testes destrutivos. Em estudos ambientais com métodos geofísicos, a imagem com Tomografia de Resistividade Elétrica (TRE) é a técnica mais aplicada. Juntamente com outros métodos diretos de investigação, a TRE pode auxiliar na detecção e monitoramento de áreas contaminadas por exemplo, Cavalcanti et al., 2014; Porsani et al., 2004; Olofsson et al., 2006; Moreira & Braga, 2009; Moreira et al., 2009; Bacellar & Catapreta, 2010; Lopes et al., 2012; Pomposiello et al., 2012; Koda & Osiński, 2016; Araruna Júnior et al., 2016; Koda et al., 2017; Canata et al., 2018; Ferrer Ramos, 2019). Segundo Elis & Zuquette (2002), a propagação da corrente elétrica em solos e rochas ocorre devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida em poros e fissuras, que depende principalmente da composição mineralógica, porosidade, teor de

água e quantidade e natureza da água e sais dissolvidos. Portanto, os métodos elétricos são eficazes no mapeamento do lixiviado, uma solução à base de água de compostos lixiviados de resíduos, oriunda do excesso de percolação de água da chuva através de suas camadas (Christensen et al., 2001).

Como em todos os métodos geofísicos, a qualidade dos dados influencia fortemente as etapas de processamento, inversão e interpretação. Considerando os dados de resistividade elétrica, há dependência da relação sinal-ruído nas medições de diferença de potencial, resistências de contato altas, erros de espaçamento relacionados à medição nas posições dos eletrodos ou na configuração do arranjo e erros de potencial, que surgem devido ao mau contato do eletrodo, ruído de fundo, problemas de instrumentação e operação inadequada do instrumento (Zhou & Dahlin, 2003). No entanto, como o tipo de arranjo também influencia na resolução das imagens de subsuperfície, comparações de diferentes tipos de configurações têm sido exploradas a fim de aumentar a qualidade das imagens obtidas. Vários estudos têm discutido a eficiência de diferentes arranjos de eletrodos em levantamentos TRE (Zhou et al. 2002; Dahlin e Zhou 2004; Nyquist et al. 2007; Al Fouzan 2008; Guedes et al. 2020) para medir diferentes feições geológicas e/ou outras anomalias do subsolo.

Neste contexto, o presente trabalho objetiva comparar os resultados obtidos a partir de três arranjos de eletrodos (Schlumberger, dipolo-dipolo e polo-dipolo) em uma aplicação prática, quanto à capacidade de delinear a pluma de contaminação no aterro controlado de Caldas Novas, Goiás, Brasil. A área recebe resíduos sólidos urbanos há pelo menos 25 anos e atualmente contém 5 células encerradas, sendo que 2 possuem impermeabilização tecnicamente adequada e nas demais o lixo é descartado diretamente no solo. Além disso, há muito lixo espalhado por toda a área, que às vezes é apenas coberto com uma pequena camada de solo.

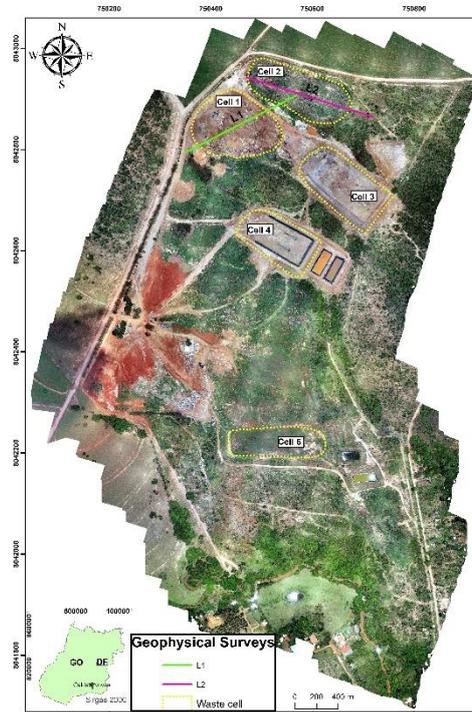
Diante do exposto, o levantamento geofísico no aterro controlado é relevante, pois pode contribuir para a avaliação ambiental da decisão quanto à recuperação da área.

### **ÁREA DE ESTUDO**

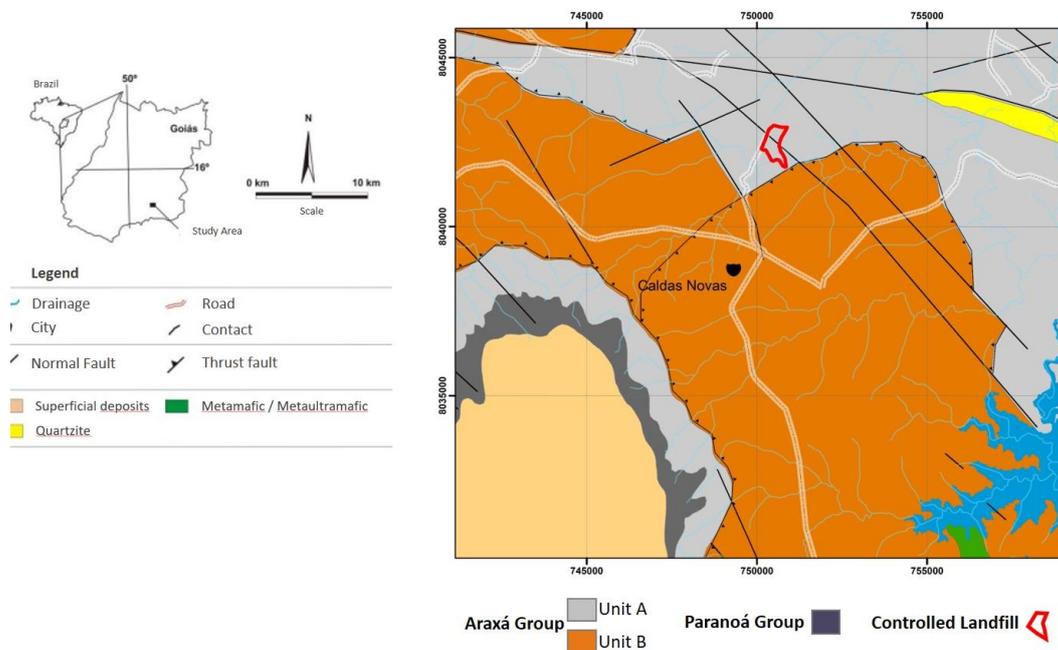
O Aterro Controlado de Caldas Novas (ACCN) está localizado dentro do perímetro urbano do município. Apresenta uma área de 50 hectares, localizado em uma declividade de aproximadamente 6 a 8%, com escoamento superficial em direção ao córrego Córrego Fundo. Atualmente no local, existem cinco células encerradas de deposição de resíduos. Duas células foram escolhidas para o levantamento TRE. Os dados foram adquiridos ao longo de dois perfis (L1 e L2; Figura 4-1).

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Formação Araxá (Figura 4-2), composta, segundo Moreira et al. (2008), na região de Rio Quente e Caldas Novas

– GO por duas unidades, denominadas Unidade A e Unidade B. A primeira, constituída por sedimentos metamorfoseados de plataforma marinha rasa, é representada por xistos, quartzitos e quartzitos com metacalcário e lentes de talco. xisto. O segundo é constituído por uma sequência pelítico-psamítica marinha metamorfoseada composta por quartzito, xistos e lentes de metacalcário e quartzito micáceo.



**Figura 4-1** Mapa de localização da área de estudo com ênfase nos perfis da TRE. O perfil L1 foi adquirido de SO (sudoeste) para NE (nordeste), e o perfil L2 de L (leste) a O (oeste).



**Figura 4-2** Mapa Geológico simplificado da região de Caldas Novas – Rio Quente, mostrando a posição da área de estudo. Moreira et al. (2008).

## 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

As seções de TRE foram adquiridas ao longo de duas células de disposição de resíduos sólidos onde havia informações sobre sua espessura.

Antes do levantamento de campo, foram criados protocolos de aquisição para cada arranjo de eletrodos com o software SuperSting Administrator (AGIUSA), que define os parâmetros de atribuição dos eletrodos para cada ciclo de injeção de corrente (Tabela 4-1).

**Tabela 4-1** Parâmetros das configurações usadas nos arranjos Polo Dipolo (PD), Dipolo-Dipolo (DD) e Schlumberger (SH)

Parameters	Arrays					
	L1			L2		
	PD	DD	SH	PD	DD	SH
Electrodes numbers	53					
Data numbers	681	771	460	686	762	461
Line length (m)	265					
Maximum Voltage (V)	400					
Injection time (ms)	400					
Maximum depth (m)	40			60		

Os dados foram adquiridos usando três arranjos de eletrodos diferentes: Schlumberger (SH), Dipolo-Dipolo (DD) e Polo-Dipolo (PD). O espaçamento entre eletrodos foi fixado em 5 metros, sendo cada perfil TRE de 265 metros de comprimento. Um total de 14 níveis de profundidade de investigação foi usado. Para aquisição de dados foi utilizado o resistímetro SuperSting (AGIUSA), com quatro cabos com 14

saídas cada, uma bateria de 12V e eletrodos de aço inoxidável (Figura 4-3).

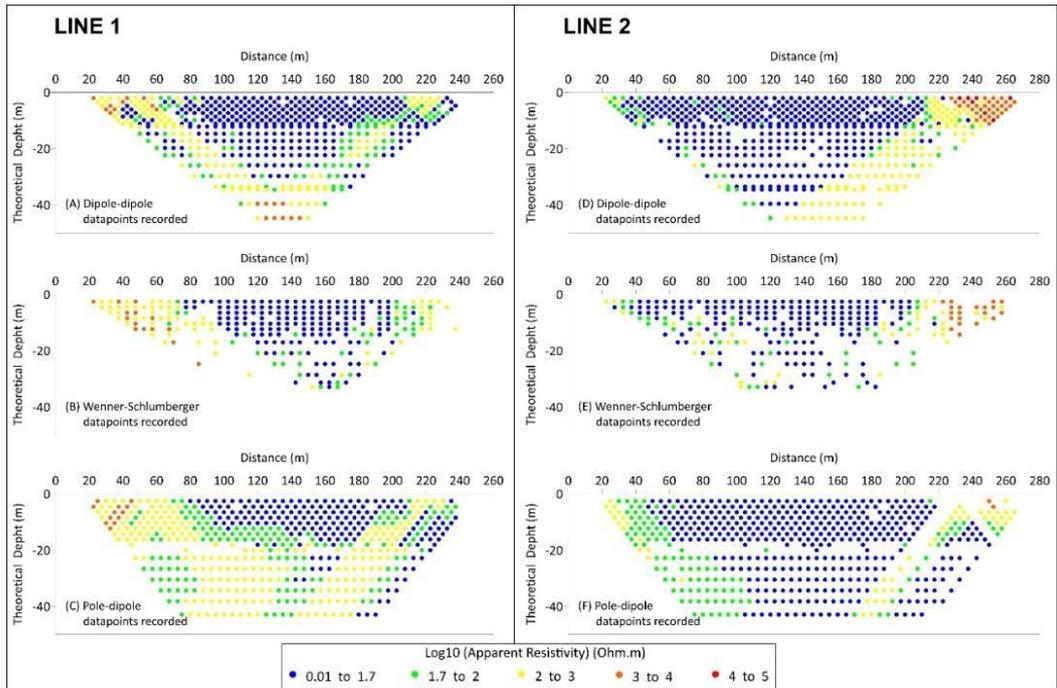


**Figura 4-3** Materiais usados para aquisição de campo. A) SuperSting conectado a cabos; B) Eletrodo de aço inoxidável conectado aos cabos; C) Montagem em linha; D) Cabos com 14 saídas cada; E) Monitoramento de Aquisição.

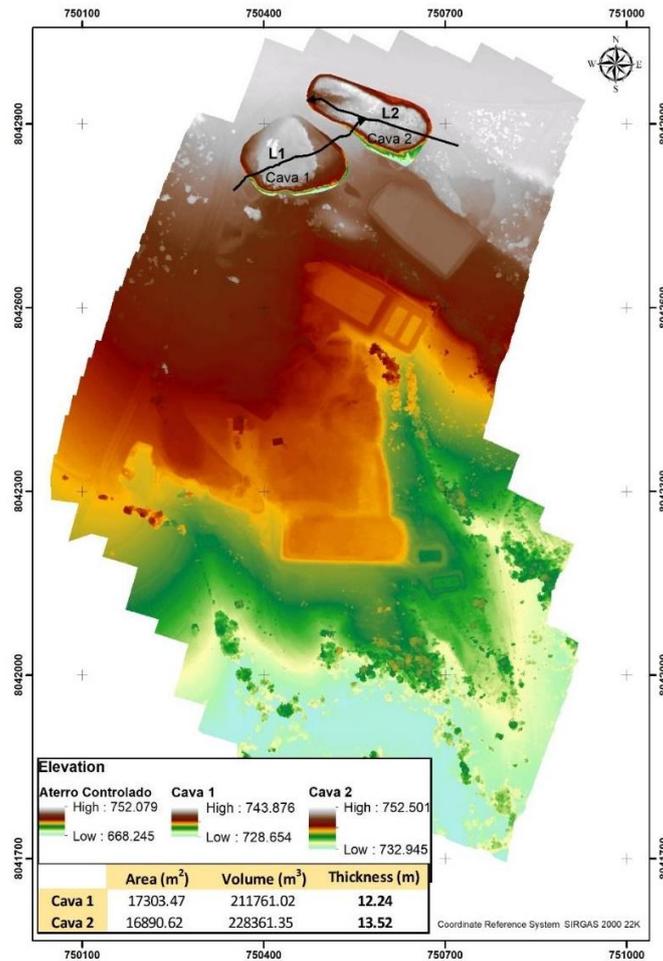
Todos os dados adquiridos e armazenados na memória do equipamento foram exportados para arquivos ASCII legíveis pelo software Res2Dinv. Em seguida, foi analisada a coerência dos registros de resistividade elétrica com base na variabilidade lateral e vertical, ou seja, remoção de picos de ruído (Figura 4-4).

Para a inversão dos dados, foi utilizada a inversão dos mínimos quadrados com a norma L2 (Loke & Dahlin, 2002). Os dados foram modelados usando os parâmetros de inversão padrão, com uma relação de filtro de achatamento vertical-horizontal igual a 0,5 para melhorar as estruturas horizontalizadas e um modelo de tamanho de grade igual ao espaçamento real entre os eletrodos.

Para estimar a espessura das células de resíduos, foi utilizado um Modelo Digital de Terreno adquirido por levantamento altimétrico de plano topográfico aéreo em 2019, do qual foi extraído o volume de cada maciço delimitando a área da célula de interesse e tomando como referência uma dimensão para sua base, possibilitando o cálculo da espessura média (Figura 4-5). Conforme mostrado na Fig. 4-5, o resíduo sob a seção de resistividade L1 tem uma espessura de 12,24 m e o resíduo sob a seção de resistividade L2 tem uma espessura de 14,42 m, ambos aproximadamente.



**Figura 4-4** Pontos de dados registrados em cada arranjo após a filtragem de picos de ruído. Linha 1 (A) Dipolo - Dipolo, (B) Schlumberger, (C) Polo-Dipolo; Linha 2 (D) Dipolo - Dipolo, (E) Schlumberger, (F) Polo-Dipolo.

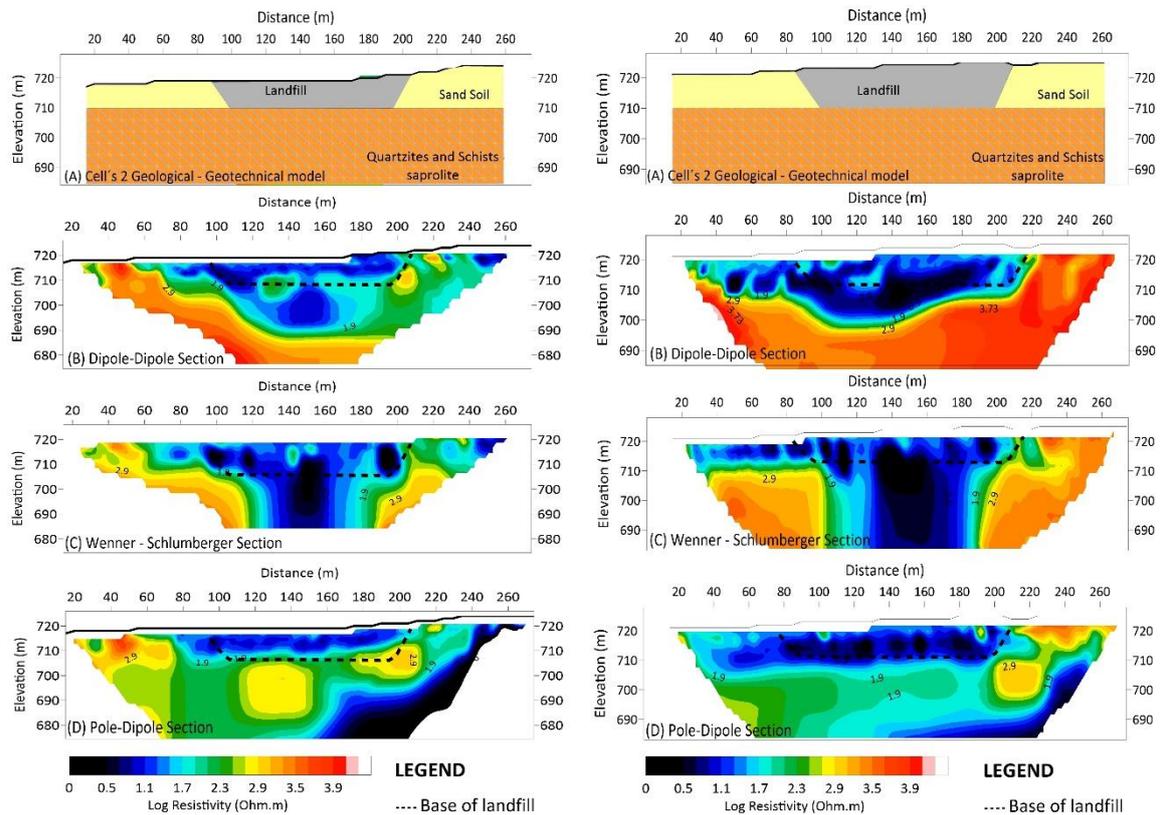


**Figura 4-5** Modelo Digital de Elevação do Aterro Sanitário Controlado de Caldas Novas, Goiás, Brasil. Os volumes destacados foram usados para calcular a espessura de resíduos em duas valas de resíduos.

### 4.3 RESULTADOS

Os resultados mostram que os tempos de aquisição das seções de resistividade Schlumberger foram as mais ágeis, seguidas de Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo. A correlação entre a quantidade de dados medidos e o tempo de aquisição é evidente, de modo que quanto maior o número de medições realizadas, maior o tempo gasto pelo equipamento realizando as observações. Conforme relatado por [Guedes et al. \(2020\)](#), o arranjo polo-dipolo, por exigir o posicionamento de um eletrodo de corrente remoto, configurou um tempo adicional, uma vez que o posicionamento desse eletrodo extra tornava mais complexa a logística do trabalho de campo.

Todos os modelos TRE obtidos após a inversão de dados nos perfis L1 e L2 são apresentados na [Figura 4-6](#). Na figura, é apresentado um modelo geológico-geotécnico, bem como a interpretação geofísica da base das células de resíduos (topo do solo natural) como uma linha vermelha.



**Figura 4-6** Comparação entre os modelos de resistividade obtidos nas Linha L1 e L2 após inversão utilizados para delimitar a Base do Aterro (interpretado).

Os modelos de resistividade mostram uma grande zona de baixa resistividade no corpo maciço, entre 0.4 e 1.5 Log ( $\Omega.m$ ), com algumas porções condutoras localizadas. Tais áreas estão possivelmente associadas a bolsões de lixiviados no subsolo. Nenhum dos modelos retornou um contraste perceptível entre os resíduos do aterro e o topo do solo. É possível que, devido ao longo tempo de operação do aterro, o nível do solo esteja contaminado, apresentando predominância de baixos valores de resistividade.

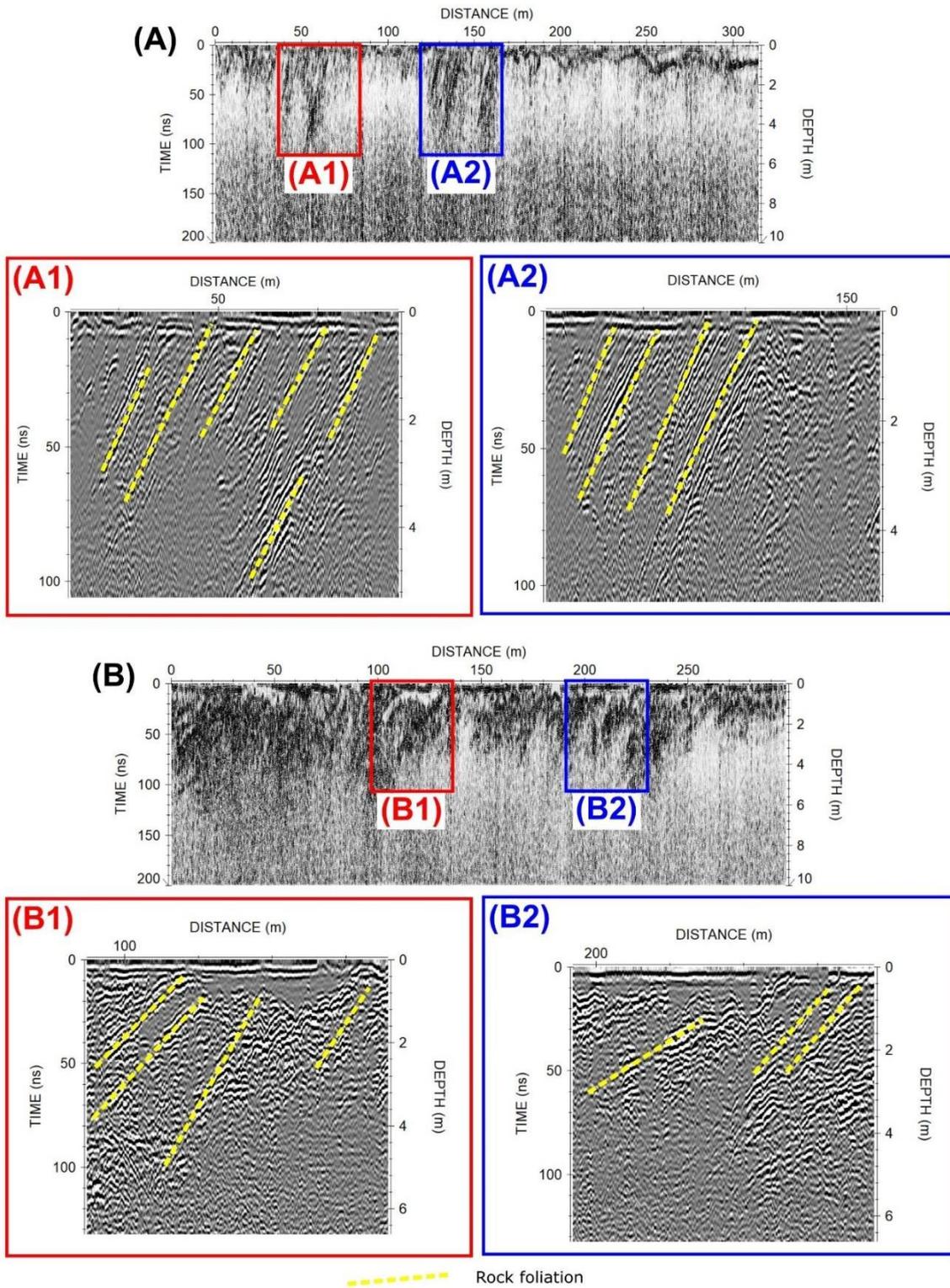
No entanto, o modelo obtido com o arranjo PD apresenta uma melhor concordância com a espessura esperada para a célula de resíduos, aderente aos valores obtidos a partir da análise do Digital Terrain Model, além de apresentar características horizontais satisfatórias para a representação da geometria da célula, não satisfatoriamente representada nos modelos obtidos com as matrizes DD e SH.

O topo rochoso é aflorante e, por vezes, apresenta um ângulo de mergulho elevado, variando entre 40 e 50 graus para nordeste (NE) devido aos intensos dobramentos, com valores de resistividade a partir de 4 Log ( $\Omega.m$ ), o que indica o início de uma provável zona insaturada. Este contraste de resistividade pode estar associado ao contexto litológico presente na área do aterro controlado, onde se encontram rochas pertencentes ao Grupo Araxá, que segundo [Moreira et al. \(2008\)](#), são compostas por micaxisto com intercalações quartzíticas e com características estruturais da rocha. Tais anomalias estruturais podem contribuir para a infiltração do contaminante, o que explicaria os baixos valores de resistividade associados à presença de rocha altamente permeável na vala.

É importante destacar no levantamento de PD da célula 2, que próximo a esta célula existe uma terceira vala de resíduos que pode ter influenciado o resultado em profundidade. No entanto, a continuidade da porção de baixa resistividade sugere uma conexão entre o lixiviado das duas células, o que pode ser visto in loco que realmente acontece.

Foram adquiridas duas seções de GPR nas proximidades das células de resíduos para verificar se havia estruturas geológicas que favorecessem a percolação de lixiviados no solo, como falhas geológicas, e para auxiliar nas interpretações sobre o nível superior da rocha ([Figura 4-7](#)). Os perfis foram adquiridos no sentido leste-oeste, utilizando o equipamento SIR3000 (GSSI). O processamento dos dados GPR foi realizado no software ReflexW da Sandmeier Geophysical Research.

A Fig. 4-7A mostra o radargrama 1 (paralelo à linha elétrica L1), no qual se observam características estruturais da rocha que, por sua vez, corroboram a infiltração do contaminante, o que explicaria os valores relativamente baixos de resistividade associados com a presença de rocha altamente permeável na trincheira. O Radargrama 2, paralelo à Linha Elétrica 2, mostrada na Fig. 4-7B, tem comportamento semelhante ao 1. Na seção do radar é possível observar refletores mais intensos, representando as intercalações de quartzito, que ao longo da extensão são compreendidas com alto ângulo de mergulho, permitindo assim uma maior percolação do lixiviado.



**Figura 4-7** Seções GPR adquiridas junto às células de resíduos. (A) Seção GPR paralela à seção de Resistividade da L1. (A1) e (A2) detalhes da seção GPR com indicação de foliações rochosas, possível quartzito. (B) Seção GPR paralela à Seção de Resistividade da L2.

#### **4.4 DISCUSSÃO**

Foi feita uma comparação entre modelos de imagens elétricas adquiridas no aterro controle de Caldas Novas - GO com três matrizes elétricas diferentes e levantamentos de georadar foram utilizados para corroborar a interpretação das seções de resolução.

Os três arranjos produziram modelos que apresentaram a célula de resíduos com baixa resistividade. No entanto, anomalias localizadas predominantemente condutivas foram exibidas de forma diferente em cada uma.

As melhores concordâncias com as informações indiretas obtidas por modelagem das células de resíduos para obtenção da espessura e por georadar em relação ao nível do embasamento rochoso foram obtidas com o arranjo polo-dipolo, que, embora não muito difundido, é amplamente utilizado por apresentar uma intensidade significativa de sinal quando comparado a matriz do arranjo ao dipolo-dipolo, por exemplo, por isso, permite investigações a maiores profundidades com boa resolução vertical.

Os arranjos Dipolo - Dipolo e Schlumberger, apesar de terem conseguido delimitar características de baixa resistividade nas células, e de alta resistividade nas bordas, não responderam satisfatoriamente em termos de geometria. O arranjo dipolo dipolo tem boa resolução lateral e geralmente oferece a melhor resolução em comparação com outros arranjos, mas é fortemente influenciado por irregularidades de cobertura da superfície.

Devido ao alto tempo de atividade do aterro controlado de Caldas Novas, não foi possível identificar o contraste de resistividade em nenhum dos modelos gerados na altura do nível do solo, o que pode ser interpretado devido à intensa percolação de chorume nos limites entre o pacote de resíduos e início do perfil do solo, o que faz com que a resistividade nesta porção seja sempre baixa.

O GPR mostrou eficiência no mapeamento do topo da rocha, subsidiando as interpretações quanto aos limites laterais das células.

#### **4.5 CONCLUSÃO**

A eletrorresistividade se mostrou eficiente na delimitação da pluma de contaminação. A comparação dos resultados mostra que os modelos de resistividade com arranjos polo-dipolo mostram resultados satisfatórios e melhor resolução em profundidade em relação ao Dipolo - Dipolo e Schlumberger. A zona com refletores bem marcados nas seções do georadar está relacionada com a elevação da resistividade elétrica do meio, permitindo assim subsidiar a interpretação de acordo com a informação

geológica disponível.

Em tempo, foi possível observar que a pluma de contaminação não está muito além dos limites estabelecidos para a base de ambas as células, e na célula 2 há uma tendência migratória para leste.

#### **4.6 REFERÊNCIAS**

AI-FOUZAN, FA. Optimization strategies of electrode arrays used in numerical and field 2D resistivity imaging surveys. PhD Thesis, University of Sains, Malaysia. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1985. NBR 8849 – Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1985. NBR 8419 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro.

BACELLAR LAP, CATAPRETA CAA. 2010. Emprego de eletrorresistividade para delimitação de pluma de contaminação por líquidos lixiviados no aterro sanitário de Belo Horizonte. *Águas Subterrâneas* 24(1): 46-58. DOI: 10.14295/ras.v24i1.20970

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional - SNIS. 2019. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília. Available online: [www.snis.gov.br](http://www.snis.gov.br) (accessed on 07/12/2021).

CANATA RE, FERREIRA FJF, STEVANATO R, SALVADOR, FAZ, SOUZA FILHO OA. 2018. Integração dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético Aterro Sanitário de Guaratuba-PR. *Boletim Paranaense de Geociências* 74(1): 11-27. DOI: 10.5380/geo.v74i1.45234

CAVALCANTI MM, BORGES WR, STOLLBERG R, ROCHA MP, CUNHA LS, SEIMETZ EX, NOGUEIRA PV, DE OLIVERA E SOUSA FRFR. 2014. Levantamento geofísico (eletrorresistividade) nos limites do aterro controlado do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília DF. *Geociências* 33(2): 298-313.

CHRISTENSEN TH, KJELDSEN P, BJERG PL, JENSEN DL, CHRISTENSEN JB, BAUN A, HERON, G. 2001. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied*

Geochemistry, 16(7-8): 659–718. DOI: 10.1016/s0883-2927(00)00082-2

DAHLIN T, ZHOU B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52(5): 379-398. DOI:10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x

ELIS VR, ZUQUETTE LV. 2002. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Geociências* 32(1): 119-134.

FERRER RAMOS N. Assessment of a groundwater system under global change scenarios: the case of Kwale (Kenya). Doctoral Thesis. UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, 2019. Available at: <http://hdl.handle.net/2117/327406>

GUEDES VJCB, LIMA VBO, BORGES WR, CUNHA LS. 2020. Comparison of the geoelectric signature with different electrode arrays at the Jockey Club Landfill of Brasília. *Brazilian Journal of Geophysics* 38(1): 41-51. DOI: 10.22564/rbgf.v38i1.2034

JOSÉ TAVARES ARARUNA JÚNIOR; PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA PIRES ; DÉBORA LOPES PILOTTO DOMINGUES ; TÁCIO MAURO PEREIRA DE CAMPOS . The Use of Ground Penetrating Radar in Municipal Solid Waste Landfill Geotechnical Investigation. *Journal of Civil Engineering and Architecture (Print)*, v. 10, p. 822-827, 2016.

KODA E, OSIŃSKI P. 2016. Site Investigation of an Industrial Landfill for the Purpose of a Remedial Works Project. *Geo-Chicago*. DOI:10.1061/9780784480168.073

KODA E, TKACZYK A, LECH M, OSIŃSKI P. 2017. Application of Electrical Resistivity Data Sets for the Evaluation of the Pollution Concentration Level within Landfill Subsoil. *Applied Sciences* 7(3): 262. DOI:10.3390/app7030262

LIU Y, LIU Y, LI Y, FU X, GUO H, MENG R, LU W, ZHAO M, WANG H. 2016. Health risk impacts analysis of fugitive aromatic compounds emissions from the working face of a municipal solid waste landfill in China. *Environment International* 97(1): 15-27. DOI: 10.1016/j.envint.2016.10.010

LOKE MH, DAHLIN T. 2002. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics* 49(3): 149-162. DOI: 10.1016/S0926-9851(01)00106-9

LOPES DD, SILVA SMCP, FERNANDES F, TEIXEIRA RS, CELLIGOI A,

DALL'ANTÔNIA LH. 2012. Geophysical technique and groundwater monitoring to detect leachate contamination in the surrounding area of a landfill – Londrina (PR – Brazil). *Journal of Environmental Management* 113(1): 481–487. DOI:10.1016/j.jenvman.2012.05.028

MOREIRA MLO, MORETON LC, ARAÚJO VA, LACERDA FILHO JV, COSTA HF. 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC –FUNMINERAL. Programa Geologia do Brasil: Integração, Atualização e Difusão de Dados de Geologia do Brasil. Programa Geologia e Mineração do Estado de Goiás: Geração e Disponibilização de Informações Geológicas e do Potencial Mineral de Goiás, 143 pp.

MOREIRA CA & BRAGA ACO. 2009. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. *Revista de Engenharia Sanitária em Ambiental* 14(2): 257-264. DOI: 10.1590/S1413-41522009000200013

MOREIRA CA, BRAGA ACO, FRIES M. 2009. Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh. *Revista Brasileira de Geofísica* 27(2): 283 – 293. DOI: 10.1590/S0102-261X2009000200010

NYQUIST JE, PEAKE JS, ROTH MJS. 2007. Comparison of an optimized resistivity array with dipole-dipole soundings in karst terrain. *Geophysics* 72(1): 139-144. DOI: 10.1190/1.2732994

OLOFSSON B, JERNBERG H, ROSENQVIST A. 2006. Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modeling. *Environmental Geology* 49(5):720-732. DOI: 10.1007/s00254-005-0117-9

POMPOSIELLO C, DAPENA C, FAVETTO A, BOUJON P. 2012. Application of geophysical methods to waste disposal studies. In Xiao-Ying Yu (Ed), *Municipal and Industrial Waste Disposal*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2012. DOI: 10.5772/29615.

PORSANI JL, FILHO WM, ELIS VR, SHIMELES F, DOURADO JC, MOURA HP. 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 55(3-4): 199–209. DOI:10.1016/j.jappgeo.2003.11.001 .

UNITED NATIONS. 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development (A/RES/70/1). New York, NY: UN General Assembly. Retrieved from

<https://sdgs.un.org/2030agenda>

ZHOU W, BECK BF, ADAS AL. 2002. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology* 42(1): 922-928. DOI: 10.1007/s00254-002-0594-z

ZHOU B, DAHLIN T. 2003. Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surface Geophysics* 1(3): 105–117. DOI: 10.3997/1873-0604.2003001

# CAPÍTULO 5

## 5. ARTIGO 2

### **“COMPORTAMENTO DO LIXIVIADO EM CÉLULAS DE LIXO COM E SEM GEOMEMBRANA NO ATERRO CONTROLADO DE CALDAS NOVAS – GO COM O USO DE GPR E ELETRORRESISTIVIDADE”**

**Resumo.** A contaminação das águas subterrâneas em função da disposição inadequada dos resíduos sólidos urbanos é um assunto muito discutido junto às comunidades, principalmente nas mais próximas aos grandes centros urbanos. Por isso, é imperativo o cumprimento das políticas públicas vigentes, principalmente quanto à impermeabilização do subsolo onde estão instaladas as áreas de disposição de resíduos. Neste contexto, esse trabalho mostra resultados de pesquisas geofísicas realizadas na área do Aterro Controlado de Caldas Novas, com o objetivo de verificar a eficiência de geomembranas na impermeabilização de cavas de resíduos sólidos urbanos. Na área foram realizadas aquisições 1D e 2D com os métodos da eletrorresistividade e radar de penetração no solo (GPR) em cima e nos arredores de células com e sem geomembranas. Nas aquisições de eletrorresistividade usou-se a técnica do caminhamento elétrico, usando-se o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 5 metros, com 14 níveis de investigação. Nas aquisições com o GPR usaram-se a técnica de afastamento constante, com o registro de dados com as antenas blindadas de 200 MHz, e a técnica da sondagem de velocidade do tipo Common Mid Point (CMP) usando-se antenas não blindadas de 80 MHz. Os resultados de CMP indicam solos não contaminados com velocidades de 0,09 a 1,2 m/ns, já nos solos contaminados o intervalo de velocidades foi de 0,05 a 0,08 m/ns. A integração dos dados de GPR com os de resistividade elétrica indicam áreas não contaminadas com resistividade elétrica acima de 400 Ohm.m e baixa atenuação do sinal do GPR (alta amplitude do sinal eletromagnético), e áreas contaminadas com total absorção do sinal do GPR e baixa resistividade elétrica (inferior a 100 Ohm.m). Os resultados geofísicos indicam que as geomembranas usadas para a impermeabilização das células não foram eficientes visto que abaixo das mesmas encontram-se zonas de alta condutividade elétrica.

*Palavras-chave: Aterro Controlado de Caldas Novas, Chorume, Eletrorresistividade, GPR.*

**Abstract.** Groundwater contamination due to the inadequate disposal of municipal solid waste is a subject much discussed with communities, mainly due to its proximity to large urban centers. Therefore, it is imperative to comply with the current public policies, especially regarding the waterproofing of the subsoil where the waste disposal areas are installed. In this context, this work shows results of geophysical research carried out in the area of the Caldas Novas Controlled Landfill, with the objective of verifying the efficiency of geomembranes in the waterproofing of urban solid waste pits. In the area, 1D and 2D acquisitions were made with the methods of electrical resistivity and ground penetrating radar (GPR) above and in the vicinity of pits with and without geomembranes. In the acquisition of electrical resistivity, the technique of electrical profiling was used, using the dipole-dipole arrangement, with spacing between the electrodes of 5 meters, with 14 levels of depth investigation. In the acquisitions with the GPR, the technique of constant offset profile was used, with the data recording with the 200 MHz shielded antennas, and the Common Mid Point (CMP) velocity sounding technique using 80 MHz unshielded antennas. The CMP results indicate uncontaminated soils (sand soils) with velocities from 0.09 to 1.2 m/ns, while in contaminated soils the velocity interval was from 0.05 to 0.08 m/ns. The integration of GPR data with electrical resistivity indicates uncontaminated areas with electrical resistivity above 400 Ohm.m and low attenuation of the GPR signal (high amplitude of the electromagnetic signal), and contaminated areas with total absorption of the GPR signal and low electrical resistivity (less than 100 Ohm.m). The geophysical results indicate that the geomembranes used for the waterproofing of the pits were not efficient since below them are areas of high electrical conduction.

**Key words:** *Caldas Novas Landfill, Leachate, Electrical Resistivity, GPR.*

## 5.1 INTRODUÇÃO

A contaminação das águas subterrâneas têm sido palco de discussões recorrentes no cenário mundial (Fitts, 2013). Historicamente, as civilizações usam o solo como local de disposição direta de resíduos diversos, inertes e perigosos ou lançam seus efluentes diretamente nos cursos de água.

De acordo com a CETESB (2001), uma das principais fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas são os lixões, aterros mal operados, seguidos de descartes irregulares de resíduos sólidos e líquidos, atividades que expõem o aquífero, vazamento nas redes de esgoto e uso incorreto de agrotóxicos e fertilizantes.

O Art. 225. Da Constituição Federal (BRASIL, 1988), preconiza que todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Além disso, o Código das Águas (BRASIL, 1934), rege que, a ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízo de terceiros.

No entanto, ao longo do tempo observa-se um aumento populacional que leva as comunidades a organizarem-se de forma complexa em diferentes territórios, o que tem gerado, em muitos casos, maior disposição de resíduos do que o solo é capaz de depurar. Só no Brasil, foram gerados em 2020 cerca de 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2021).

As políticas públicas, as discussões sobre o desenvolvimento sustentável, a resiliência e a melhor qualidade de vida, têm sido temas em ascensão em escala mundial, a exemplo dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 aos seus países membros, em que o 6º Objetivo é garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos.

Segundo o Diagnóstico de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (SNIS, 2019), no Brasil, há, 1.114 Lixões, 580 Aterros Controlados e 621 Aterros Sanitários. As disposições irregulares, lixões e aterros são potenciais causadores de contaminação do solo e das águas, pois em locais onde o solo sob os resíduos é permeável e desprotegido, o chorume pode atingir o nível freático contaminando assim os aquíferos. Por isso, é imperativo o cumprimento das políticas públicas já existentes para remediar ou até mesmo sanar esse passivo, como as diretrizes preconizadas na Política Nacional dos Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12.305 de 2010.

Além disso, a ABNT NBR 8419/1992, como norma regulamentadora que objetiva mitigar os impactos, exige que seja implementado no projeto do aterro sanitário um sistema de impermeabilização de fundo capaz de reter o lixiviado e evitar a

contaminação, chamado de liner. No mundo todo, esse sistema é usualmente composto por camadas de solo de um material de baixa permeabilidade sobrepostas por um geossintético conhecido como geomembrana (BARAN, 2021).

De acordo com a International Geosynthetics Society, a geomembrana é uma camada polimérica, plana e impermeável, usada em contato com o solo, rocha, ou qualquer outro material geotécnico em aplicações da engenharia civil. São feitas a partir de finas camadas poliméricas contínuas, podendo também ser fabricadas a partir da impregnação de geotêxteis com asfalto e muitos autores já estudaram o fluxo de contaminantes em barreiras impermeáveis, tanto experimentalmente quanto analiticamente Rowe, Hrapovic, Kosaric (1995); Park & Nibras (1987) e Sangam, Rowe (1998) a fim de avaliar sua eficiência.

No entanto, conforme dados supracitados (SNIS, 2019), apenas 26,8% dos locais de disposição de resíduos sólidos catalogados no país, usam as técnicas adequadas a fim de mitigar os impactos. Por isso, faz-se necessário e é cada vez mais solicitado pelos administradores públicos pesquisas acerca dos impactos causados nos lixões e aterros controlados para que fomentem tomadas de decisão.

Os métodos geofísicos têm sido amplamente utilizados no diagnóstico de áreas contaminadas em razão da rapidez e do custo reduzido, quando comparado com os ensaios destrutivos, em estudos ambientais. Os principais são: eletromagnéticos, eletrorresistividade, potencial espontâneo, radar de penetração no solo e, eventualmente, magnetometria (CETESB, 2001), sendo a Eletrorresistividade a técnica mais aplicada pois apresenta boa resposta na identificação de bolsões de chorume devido ao contraste de resistividade no meio.

Os resultados de geofísica em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos mostram eficiência nas investigações em (Cavalcanti et al., 2002; Porsani et al., 2004; Olofsson et al., 2006; Moreira et al., 2009; Bacellar & Catapreta, 2010; Pomposiello et al., 2012; José Tavares Araruna Júnior et al., 2016; Canata et al., 2018).

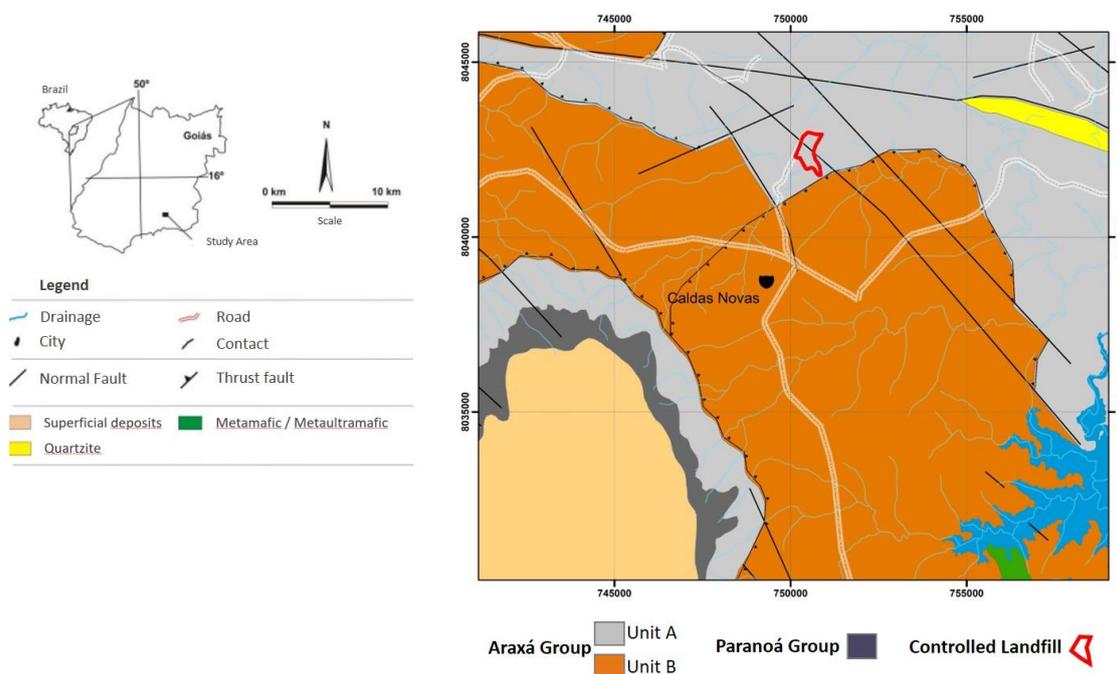
Segundo Elis e Zuquette (2002), a propagação de corrente elétrica em solos e rochas se dá devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, sendo afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor de água e quantidade e natureza de sais dissolvidos, sendo os métodos elétricos são efetivos no mapeamento de áreas de percolação de chorume que, segundo Christensen et al. (2001), é uma solução à base de água de compostos lixiviados do lixo, originada pelo excesso de percolação de água pluvial através de suas camadas.

A preocupação com a qualidade das águas subterrâneas é indispensável no planejamento e no monitoramento de uma área destinada à disposição de resíduos sólidos. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo utilizar métodos

geofísicos para analisar o comportamento do chorume nas células de disposição de resíduos sólidos (células), construídas com e sem impermeabilização de fundo, no Aterro Controlado de Caldas Novas, estado de Goiás.

### ÁREA DE ESTUDO

O Aterro Controlado de Caldas Novas (ACCN) localiza-se dentro do perímetro urbano do município de Caldas Novas, no Estado de Goiás (Figura 5-1). A área do aterro possui em torno de 50 hectares, encontra-se numa vertente com aproximadamente 6 a 8% de declividade, com o escoamento superficial em direção ao Córrego Fundo a sul. A área está inserida no contexto geológico da Formação Araxá, composta, segundo Moreira et al. (2008), na região de Rio Quente e Caldas Novas, por duas unidades denominadas Unidade A e Unidade B. A primeira, constituída por sedimentos de plataforma marinha rasa metamorfisados, representados por xistos, quartzitos e quartzitos com lentes de metacalcário e talco xisto. Já a segunda, constituída por uma sequência pelítica-psamítica marinha metamorfisada composta de quartzito, xistos e lentes de metacalcário e quartzito micáceo.



**Figura 5-1** Mapa geológico simplificado da região de Caldas Novas e Rio Quente, estado do Goiás (Moreira et al, 2008).

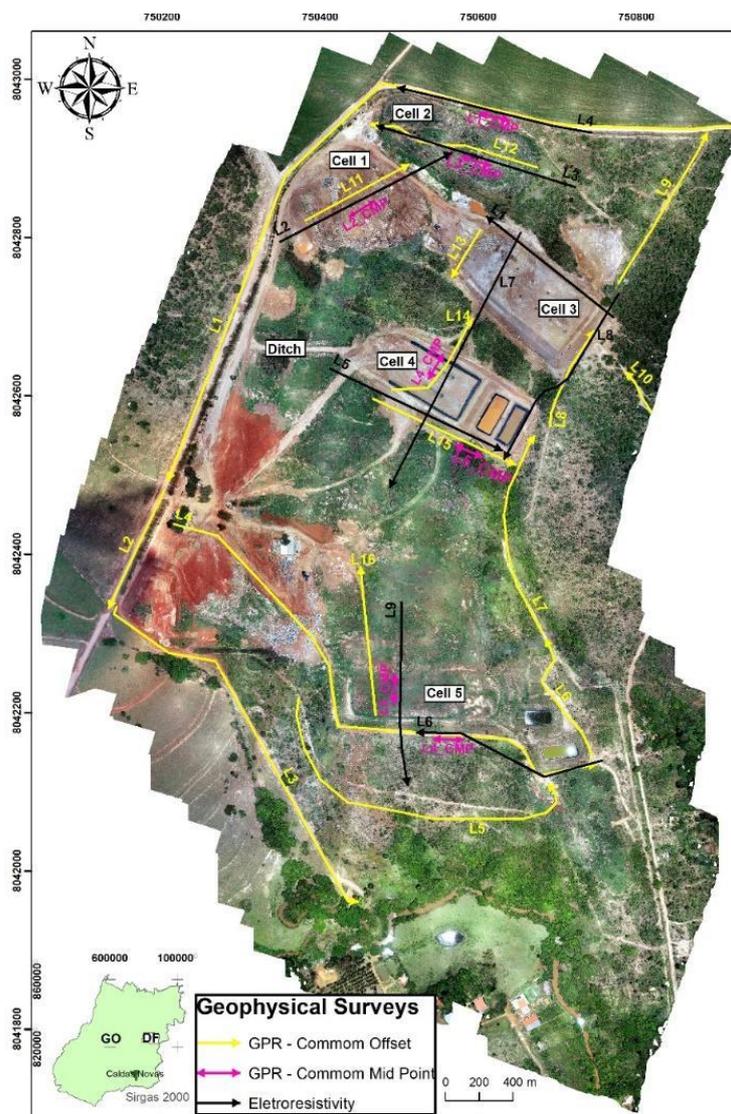
Atualmente, há 5 (cinco) células oficiais de deposição de resíduos encerradas, além de porções da área onde foram dispostos resíduos e cobertos aleatoriamente, conforme informações de antigos técnicos que trabalharam na área e 1 (uma) vala onde foram depositados resíduos hospitalares em torno do ano de 2010. Destas, segundo

informações fornecidas por servidores da prefeitura, duas têm impermeabilização de base e em 3 três os depósitos são diretamente no solo.

## **5.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

As aquisições geofísicas ocorreram dentro e no entorno dos limites da área do ACCN (Figura 5-2), para averiguação de ocorrência de contaminação por chorume, com o uso dos métodos de eletrorresistividade e georadar.

Na área, foram realizadas 16 seções de Ground Penetrating Radar (GPR) usando-se a técnica do afastamento constante (Common Offset) e 7 sondagens de velocidade do tipo Common Mid Point (CMP). Com o método da eletrorresistividade foram obtidas 9 seções usando-se a técnica do caminhamento elétrico. Com o GPR objetivou-se identificar o comportamento pedológico e geológico fora e dentro das células, além de determinar zonas de absorção do sinal eletromagnético relacionadas à presença de chorume no subsolo. Com a eletrorresistividade buscou-se identificar possíveis zonas contaminadas com chorume, bem como determinar a efetividade das camadas de geomembrana em inibir a percolação do chorume para o subsolo.



**Figura 5-2** Imagem de drone georeferenciada com a localização das seções de GPR, sondagens de velocidade do tipo CMP, e seções de resistividade elétrica, adquiridas no Aterro Controlado de Caldas Novas, Goiás.

O Radar de Penetração no Solo é um método eletromagnético que usa ondas de rádio em frequências muito altas (normalmente entre 10 à 2500MHz) para a obtenção de imagens de alta resolução do subsolo. Este método consiste na emissão de ondas eletromagnéticas (EM) e a recepção das ondas refletidas nas interfaces do subsolo. Os principais fatores que influenciam na qualidade do sinal do georadar são: a frequência e a velocidade da onda EM no meio, o coeficiente de reflexão (contraste de permissividade dielétrica entre os meios) e a atenuação do meio. No método GPR, tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas EM, respectivamente (ANNAN, 1996). Quanto maior a condutividade, maior a atenuação do sinal eletromagnético.

Neste trabalho foram aplicadas duas técnicas de aquisição: Common offset (afastamento constante) e Common Mid Point (CMP). A primeira, que segundo [Jol \(2009\)](#) é a forma mais comum de medições GPR, implanta um transmissor e um receptor em uma geometria fixa, que são movidos sobre a superfície para detectar reflexões de estruturas geológicas e antrópicas em subsuperfície. Já a segunda, é utilizada para estimar a velocidade de propagação da onda de radar em função do tempo de percurso (tempo duplo). Na técnica CMP, as antenas são deslocadas em sentidos opostos em relação a um ponto fixo central.

As seções de GPR foram adquiridas com o equipamento SIR 3000 (GSSI), acoplado a antenas blindadas de 200 MHz, espaçamento entre os traços de 5 cm, com 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem temporal de 0,39 ns e janela temporal de 400 ns ([Figura 5-3](#)). Nas investigações com a técnica CMP usou-se o sistema SIR 3000 acoplado a antenas não blindadas de 80 MHz, amostragem entre os traços de 20 cm, 512 amostras por traço, intervalo de amostragem temporal de 0,97 ns e janela temporal de 500 ns.

Das 16 linhas obtidas na área, 1 foi a montante da área (L1) utilizada como seção de referência de *background*, 10 nos entornos e bordas das células (L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L15) e 4 sobre células encerradas (L11, L12, L13, L14 e L16). As aquisições de CMP foram obtidas em 7 pontos, sobre as seções de georadar.



**Figura 5-3** Fotografias evidenciam a aquisição de dados de GPR na área do Aterro Controlado de Caldas Novas - GO. (A) e (B) Coleta de dados GPR com a técnica Common Offset com o equipamento SIR3000 e antenas blindadas de 200 MHz. (C) e (D) Aquisição de sondagem de velocidade (CMP) com antenas não blindadas de 80 MHz.

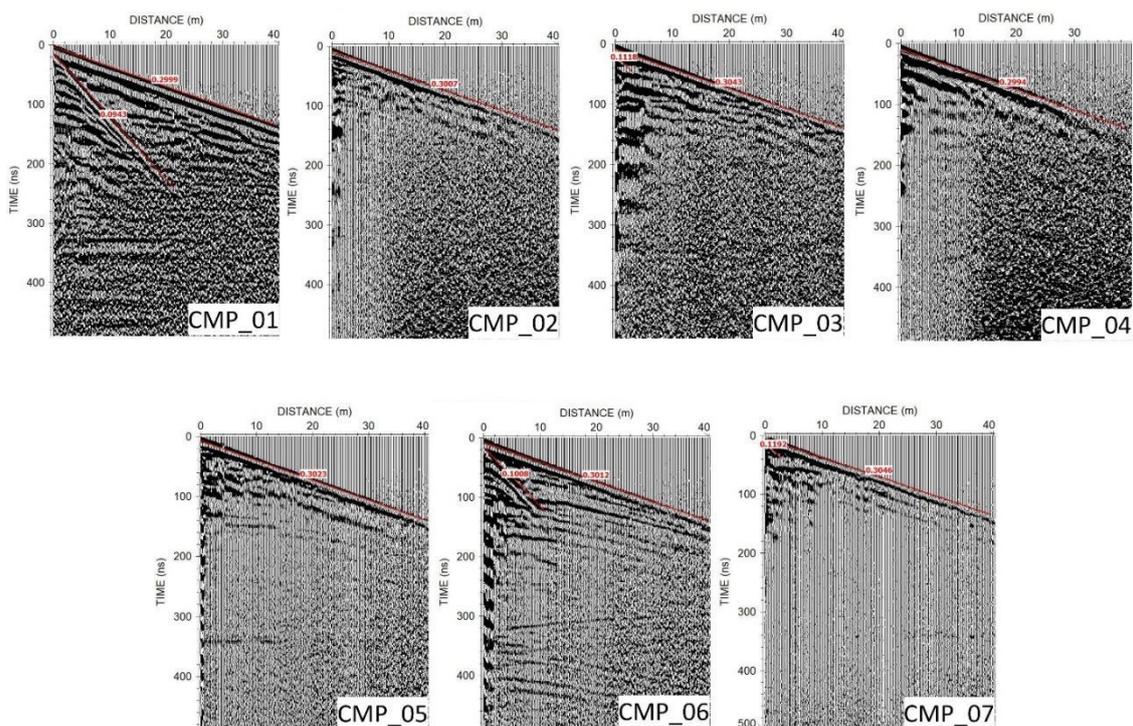
Os dados obtidos com o GPR foram processados no software ReflexW (Sandmeier, 2017). No processamento, das seções adquiridas com a técnica Common – Offset, usaram-se as seguintes etapas:

- Correção Estática - corrigiu a posição da primeira onda que chega (por exemplo, a onda direta da fonte para o receptor) para a posição  $y-(\text{tempo}) = 0$ , removendo o delay inserido nos traços durante a aquisição de dados para evitar a perda do registro do tempo zero.

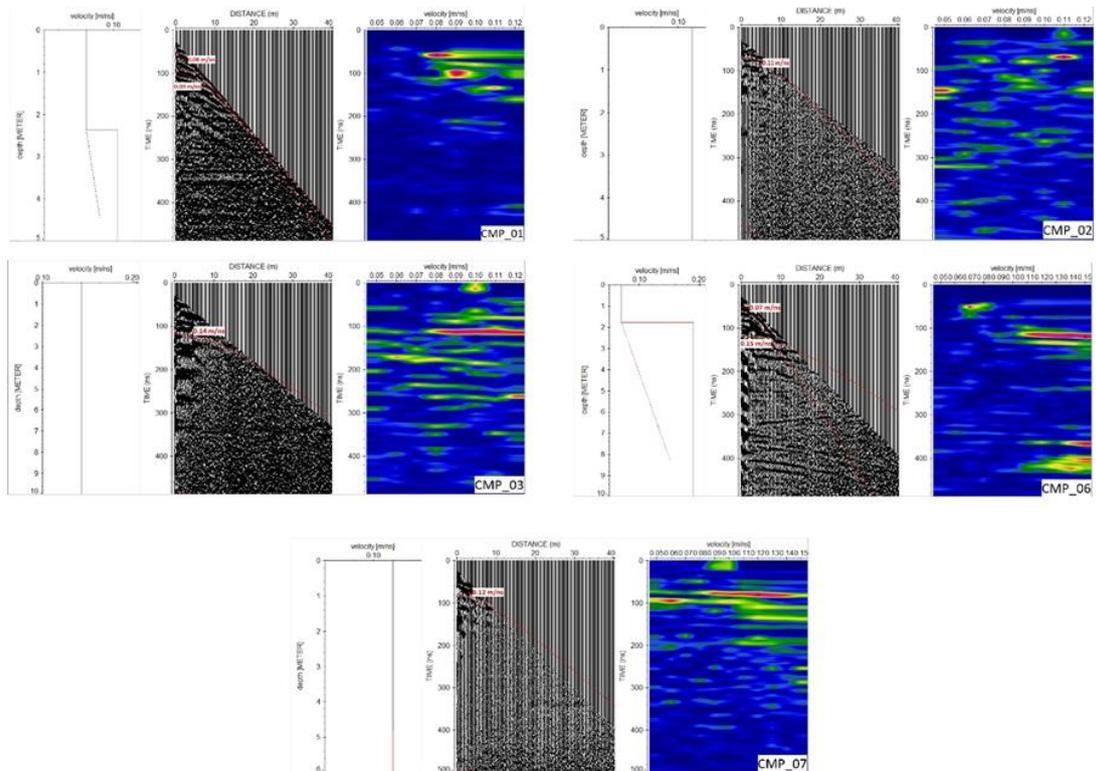
- Ganho de decaimento de energia – este filtro proporcionou um ganho de energia na direção y-(tempo) e atuou de forma independente em cada traço, ao longo de todo o perfil, assim realçou os refletores;
- Remoção de Background - eliminou ruídos consistentes temporalmente de todo o perfil, possibilitando tornar visíveis os sinais, anteriormente cobertos por esse ruído, enfatizando assim sinais relacionados às camadas geológicas;
- Filtro passa banda no domínio da frequência – removeu os ruídos aleatórios o que conseqüentemente aumentou a relação sinal/ruído;
- Migração – corrigiu as posições dos difratores de pequena escala ou refletores inclinados, utilizando-se um determinado modelo de velocidade em profundidade, que neste trabalho foi obtida através de ajustes hiperbólicos e das análises de CMP.
- Conversão de Tempo em Profundidade - conversão do tempo de viagem da onda eletromagnética em profundidade. As velocidades das ondas refletidas, utilizadas na migração e na conversão do tempo em profundidade, foram obtidas por ajustes hiperbólicos nas seções 2D e nas CMPs foi com a análise de *Semblance*, que representa uma medida da razão entre a energia do sinal eletromagnético após o somatório dos traços e a energia de todos os traços envolvidos no somatório espectro de velocidade determinado por medidas de coerência [Yilmaz \(2001\)](#). Com isso, é possível encontrar velocidades que corrijam os deslocamentos causados pelos diferentes afastamentos fonte-receptor, para assim obter como resultado uma primeira aproximação para as velocidades reais de subsuperfície;
- Correção 3D da topografia - Correção independente do tempo com base em um arquivo ASCII contendo as informações de posicionamento para cada traço, corrigindo os desníveis topográficos de cada traço da seção para reposicionar corretamente os refletores e conseqüentemente as estruturas geológicas.

No processamento dos dados de CMP optou-se pelo uso de um fluxo mais simplificado para evitar mudança nos posicionamentos dos refletores (fase) e conseqüente mudança nos valores de velocidade da onda eletromagnética. Antes da aplicação de ganhos, filtros ou uso do mute, houve a análise da geometria dos traços uma vez que em ambientes com superfícies irregulares são comuns os erros de posicionamento principalmente quando usam-se antenas não blindadas biestáticas. Desse modo, para a verificação da geometria dos traços houve a análise da velocidade

de propagação da onda eletromagnética no ar (velocidade aproximada de 0,3 m/ns) e consequentemente da velocidade da onda direta no solo (Figura 5-4). Após a verificação dessas velocidades, houve a aplicação de ganho na direção X, e filtragem do tipo mute para eliminar as chegadas das ondas diretas no ar e no solo (Figura 5-5). As análises de semblance obtidas após a análise de coerência de velocidade, forneceram dados satisfatórios, exceto CMP\_04 e CMP\_05, em que nenhum refletor foi observado. Os modelos de velocidade obtidos mostram variações de velocidade de 0.07m/ns a 0.11m/ns



**Figura 5-4** Sondagens de velocidade do tipo CMP, após a correção do tempo zero, com a indicação das velocidades da onda direta no ar e da onda direta no solo. Nas CMPs realizadas dentro das cavas de resíduos sólidos não há registro da velocidade da onda direta no solo, o que indica absorção total do sinal já na parte superficial do solo



**Figura 5-5** Modelos e painéis de velocidade obtidos após a análise das sondagens de velocidade do tipo CMP obtidos na área do Aterro Controlado de Caldas Novas, GO.

## ELETRORRESISTIVIDADE

No método da eletrorresistividade usa-se uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de A e B), com objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície (Elis e Zuquette, 2002). Esse método é comumente utilizado para investigar discontinuidades horizontais e verticais através de suas propriedades elétricas e também detectar corpos tridimensionais com condutividade elétrica anômala (resistividade). Kearey (2009) ressalta que a maior parte dos minerais formadores das rochas são isolantes, e por esse motivo a resistividade das rochas é, na maioria das vezes, controlada por suas características eletrolíticas, pela passagem de íons através da água presente nos poros.

A técnica de caminhamento elétrico, aplicada neste trabalho, consiste na aferição de medidas da resistividade aparente ao longo de um perfil, com o objetivo de investigar suas variações em um ou mais níveis de profundidade. O arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo, que é caracterizado por sua configuração geométrica de espaçamento igual entre os eletrodos MN e AB, com deslocamento do centro de ambos os dipolos ao

longo da linha, usando espaçamento entre os dipolos de 5 metros, e 14 níveis de profundidade, em linhas com as dimensões de 265 metros de comprimento.

Para a aquisição dos dados de resistividade elétrica foi utilizado o resistivímetro **SuperSting (AGIUSA)**, 4 (quatro) cabos com 14 (catorze) saídas cada um, bateria 12V e eletrodos de aço inox (Figura 5-6). Na Tabela 1 constam as informações dos parâmetros de aquisição. Das 9 linhas investigadas, 1 foi a montante da área (L4) utilizada como seção de referência de *background*, 1 na borda de uma célula de lixo (L1), 4 sobre células encerradas (L2, L3, L7 e L9) e 2 a jusante na borda de células de lixo (L5 e L6), a fim de interceptar o fluxo do possível contaminante.



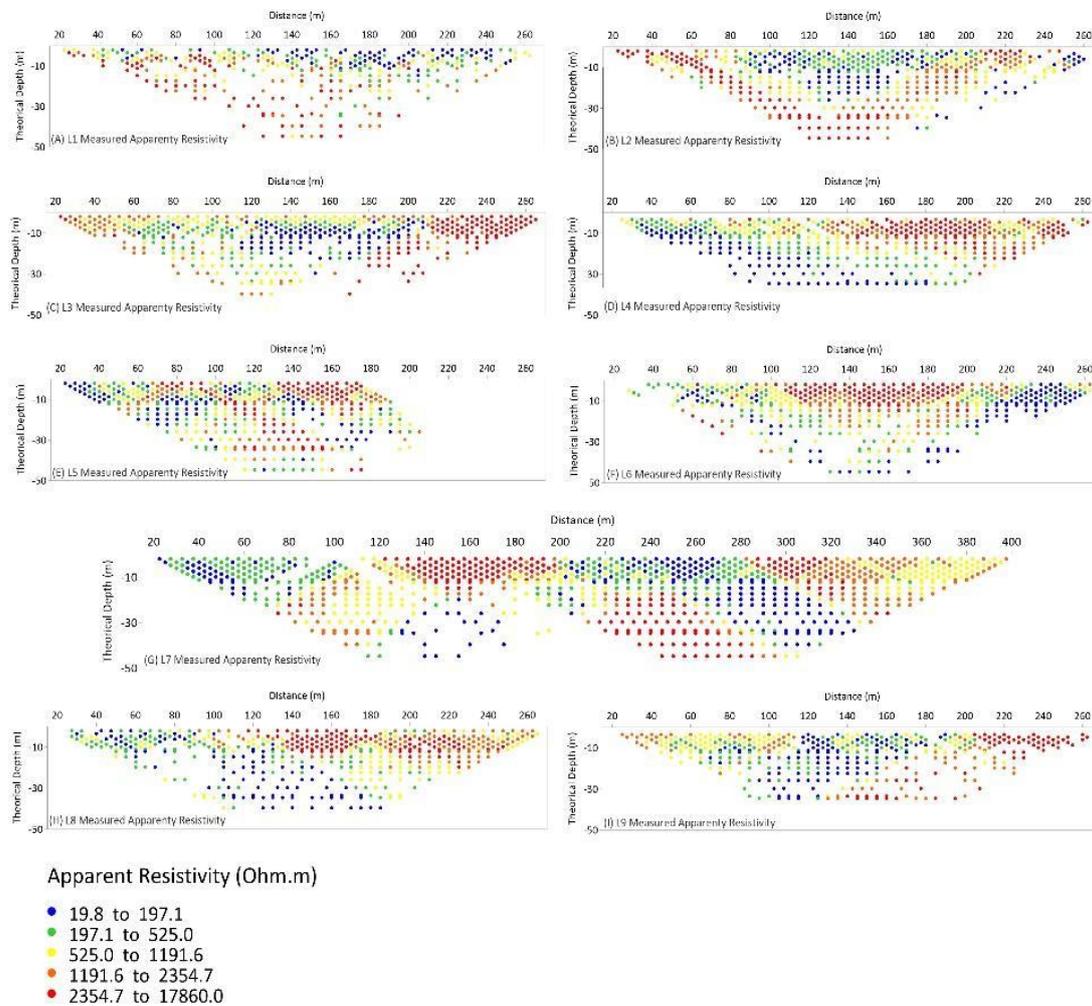
**Figura 5-6** Fotografias evidenciam a aquisição de dados de resistividade elétrica na área do Aterro Controlado de Caldas Novas. (A) Foto de operador conectando os cabos multieletródicos. (B) Foto detalha eletrodo conectado ao cabo multieletródico. (C) Detalhe do eletrorresistivímetro Supersting conectado ao computador de eletrodos (Switch box). (D) Foto confirma a equipe durante a aquisição de dados de resistividade elétrica.

**Tabela 5-1** Parâmetros de aquisição dos dados de resistividade elétrica obtidos na área do Aterro Controlado de Caldas Novas, GO.

Parameters	Dipole Dipole Array								
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Eletrodes no.	53								
Datas no.	349	525	513	589	478	536	995	516	502
Line length (m)	265								
Max Voltage (Vab)	400								
Injection time (ms)	400								
Maximum depth (m)	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Os dados de resistividade elétrica obtidos e armazenados na memória do equipamento foram transferidos para o software Res2Dinv (Aarhus Geosoftware). No software ocorreram filtragens dos dados em função de elevada resistência de contato e

valores discrepantes dos pontos vizinhos (remoção de *spikes*; Figura 5-7). Posteriormente foi aplicada uma rotina de modelagem inversa que usou a rotina de inversão por mínimos quadrados, ou norma-L2 (Loke & Dahlin, 2002), com os parâmetros de inversão padrão do software. As profundidades dos pontos amostrados foram calculadas conforme o modelo de profundidade proposto por Edwards (1977).



**Figura 5-7** Dados dos pontos gravados em cada seção após filtragem de ruídos. (A) Line 1 (L1), (B) Line 2 (L2), (C) Line 3 (L3), (D) Line 4 (L4), (E) Line 5 (L5), (F) Line 6 (L6), (G) Line 7 (L7), (H) Line 8 (L8), (I) Line 9 (L9)

Para a delimitação das prováveis plumas de contaminação adotou-se como referência os valores de resistividade obtidos nas células de disposição de resíduos, onde certamente há chumbo, que foram menores ou iguais a 100 ohm.m.

### 5.3 RESULTADOS

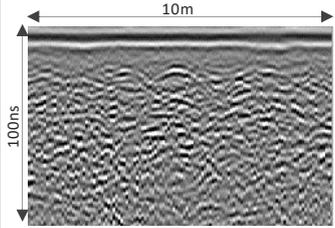
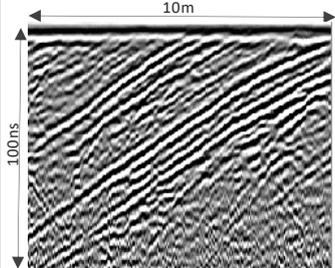
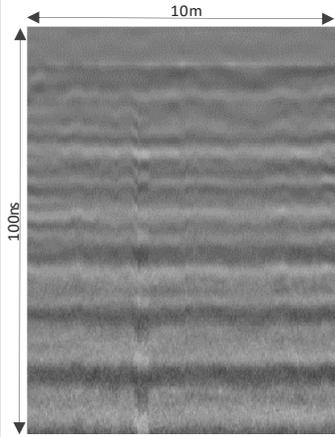
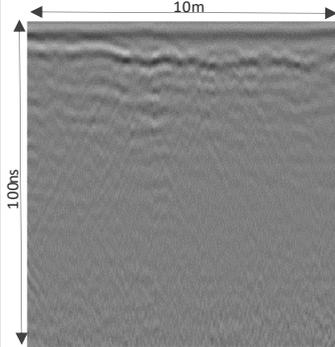
Nas seções de GPR obtidas na área do Aterro Controlado de Caldas Novas foram identificados 4 padrões distintos de reflexão: Pr1, Pr2, Pr3 e Pr4 (Tabela 5-2).

- O primeiro padrão de reflexão (Pr1) é caracterizado pela presença de refletores caóticos de baixa amplitude com a ocorrência de hipérbolas de

alta amplitude. Esse padrão ocorre comumente na parte superficial das seções de GPR, e é interpretado como as camadas de solo (padrão caótico de baixa amplitude) com a presença de blocos de rochas e raízes de árvores (hipérboles de alta amplitude);

- O padrão de reflexão (Pr2) caracteriza-se pela presença de refletores inclinados contínuos de alta amplitude, são comumente circundados por refletores de baixa amplitude. Esse padrão de reflexão ocorre comumente abaixo de Pr2 e em função das características geométricas são relacionados às interfaces de camadas de saprólitos de quartzitos e xistos presentes na área do ACCN;
- O padrão de reflexão (Pr3) mostra refletores horizontais e contínuos de baixa amplitude. Esse padrão ocorre apenas acima das cavas de resíduos sólidos. Esse padrão sugere que há uma forte impedância entre as camadas de material selante usado na compactação dos resíduos sólidos e os pacotes de lixo, o que causa uma reverberação do sinal eletromagnético ao longo do registro do GPR ([Splajt et al., 2003](#));
- O quarto padrão de reflexão (Pr4) caracteriza-se pela ausência de reflexão, ou seja, os valores de amplitude tendem a zero. Esse padrão é característico de áreas muito condutivas, comumente relacionadas à presença de material argiloso ou de fluidos contaminantes. No caso da área de pesquisa, sugere-se que o mesmo indique as áreas com percolação de chorume proveniente da lixiviação dos resíduos sólidos.

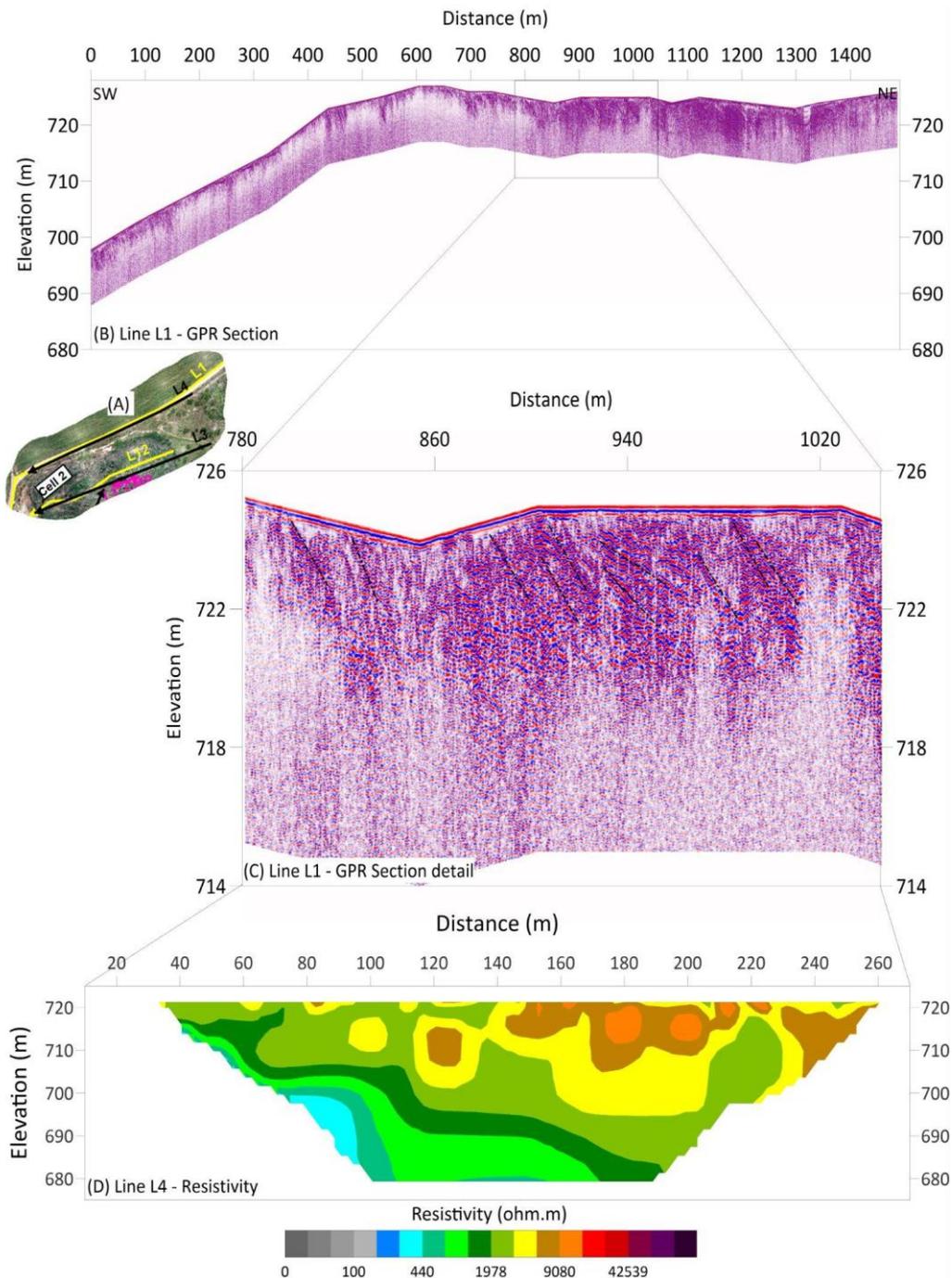
**Tabela 5-2** Padrões de reflexão do sinal eletromagnético do GPR identificados nas seções de GPR realizadas na área do Aterro Controlado de Caldas Novas, GO

Sigla	Padrão de Reflexão GPR	Descrição	Interpretação
Pr 1		Refletores caóticos de baixa amplitude, seguidos de hipérboles de alta amplitude e refletores descontínuos	Perfil de Intemperismo com solo areno - siltoso homogêneo, seguido de blocos de rocha
Pr 2		Refletores inclinados, contínuos, de alta amplitude, circundados por refletores e baixa amplitude	Saprolitos de Quartizitos e xistos da Formação Araxá
Pr 3		Refletores horizontais, contínuos, de alta amplitude, com porções de baixa amplitude - atenuação do sinal GPR	Células de Resíduos
Pr 4		Perfil de Intemperismo com solo areno - siltoso homogêneo, com atenuação do sinal GPR	Zonas contaminadas por percolação do lixiviado

Os resultados obtidos com o GPR têm a vantagem de fornecer imagens de alta resolução em uma escala variando de poucos centímetros a poucos metros (Annan e Cosway, 1994). As seções atingiram entre 6 e 10 metros de profundidade e os resultados com melhor resolução foram obtidos nas bordas das células de resíduos sólidos e nos arredores do Aterro Controlado de Caldas Novas.

As seções que representam as características de background na área do aterro controlado foram obtidas a jusante das células de disposição e são representadas pelas Linhas L1 de GPR, com ênfase em seu respectivo segmento que é coincidente com a Linha (L4) de resistividade elétrica (Figura 5-8).

A seção de resistividade elétrica apresenta elevados valores de resistividade, característicos de quartzitos e xistos, que junto a configuração apresentada pelo radargrama, corroboram a com a informação geológica disponível, apresentando refletores intensos que podem indicar a foliação das referidas rochas.

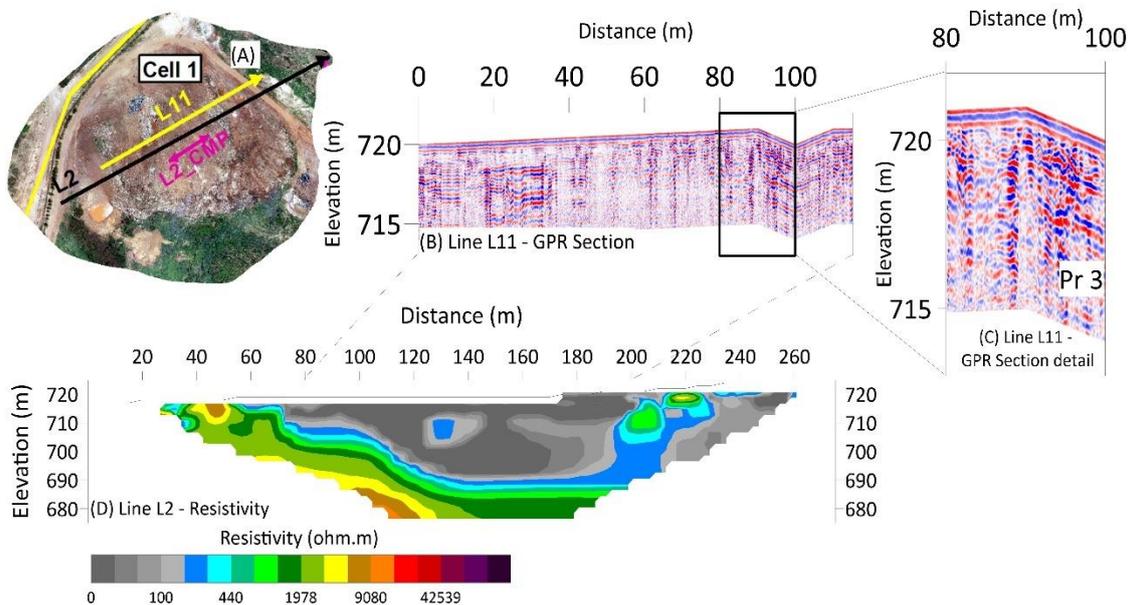


**Figura 5-8** (A) Referência da localização. (B) GPR (Common - Offset) Seção a montante da área do aterro controlado. (C) Detalhes da seção de GPR, mostrando as possíveis foliações de rochas quartzíticas. (D) Seção de resistividade na mesma linha da seção de GPR.

As seções que representam as características geofísicas sobre as células de disposição de resíduos na área do aterro controlado são representadas pelas Linhas L11 de GPR e por um segmento da Linha (L2) de resistividade elétrica que é coincidente.

O modelo de velocidade (L2\_CMP) obtido sobre a (L11) de GPR foi aplicado no referido radargrama para as etapas de migração e para a conversão do tempo em profundidade.

A **Figura 5-9** mostra a seção de resistividade elétrica apresenta baixos valores de resistividade, característicos de lixiviados presentes em meio ao resíduo disposto, que junto à configuração apresentada pelo radargrama, corroboram a com a informação sobre o manejo de resíduos na área, apresentando refletores atenuados que podem indicar a presença de chorume.



**Figura 5-9** (A) Referência da localização. (B) GPR (Common - Offset) Seção sobre uma célula de deposição de resíduos. (C) Detalhe do padrão de reflexão observado. (D) Seção de resistividade na mesma linha da seção de GPR.

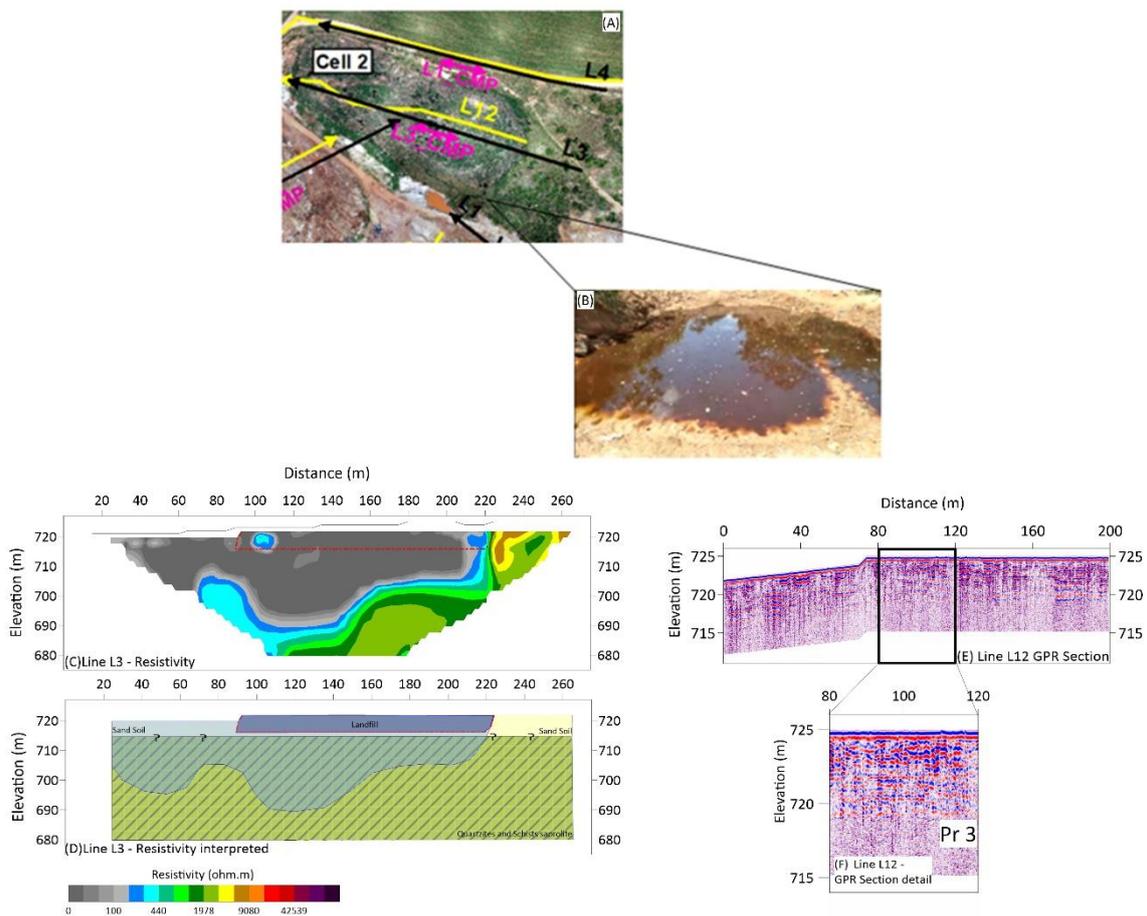
### CÉLULAS COM E SEM IMPERMEABILIZAÇÃO DE BASE

Com base nos resultados obtidos, analisou-se 3 células de disposição de resíduos com e sem geomembrana a fim de comparar o comportamento do lixiviado.

Sobre a célula 2, que não contempla aplicação de geomembrana, foi executada a Linha L3 de elétrica e a seção L12 de GPR (que se inicia aos 100m da L3 de elétrica), **Figura 5-10**. Essas seções foram adquiridas de leste a oeste, conforme Fig. 2, em sentido topográfico ascendente. O resultado da inversão elétrica mostra valores de baixa resistividade (<100 ohm.m) abaixo da base da célula, que está em torno de 12m de profundidade, e além dela, indicando percolação vertical e lateral (ao menos 100m sentido leste) do lixiviado produzido que atualmente alcança profundidades em torno de 30m. Essa evidência é endossada pelos relatos de vazamentos superficiais, principalmente no período chuvoso, no talude leste desta célula, onde forma-se uma verdadeira drenagem de chorume que se acumula também na célula a sul (Célula 3), **Figura 5-11**.

A seção de GPR evidencia a deposição de resíduos, com refletores horizontalizados contínuos, de alta amplitude, com porções de baixa amplitude devido a atenuação do sinal GPR (Pr3) causada pela presença dos líquidos oriundos da decomposição dos materiais orgânicos.

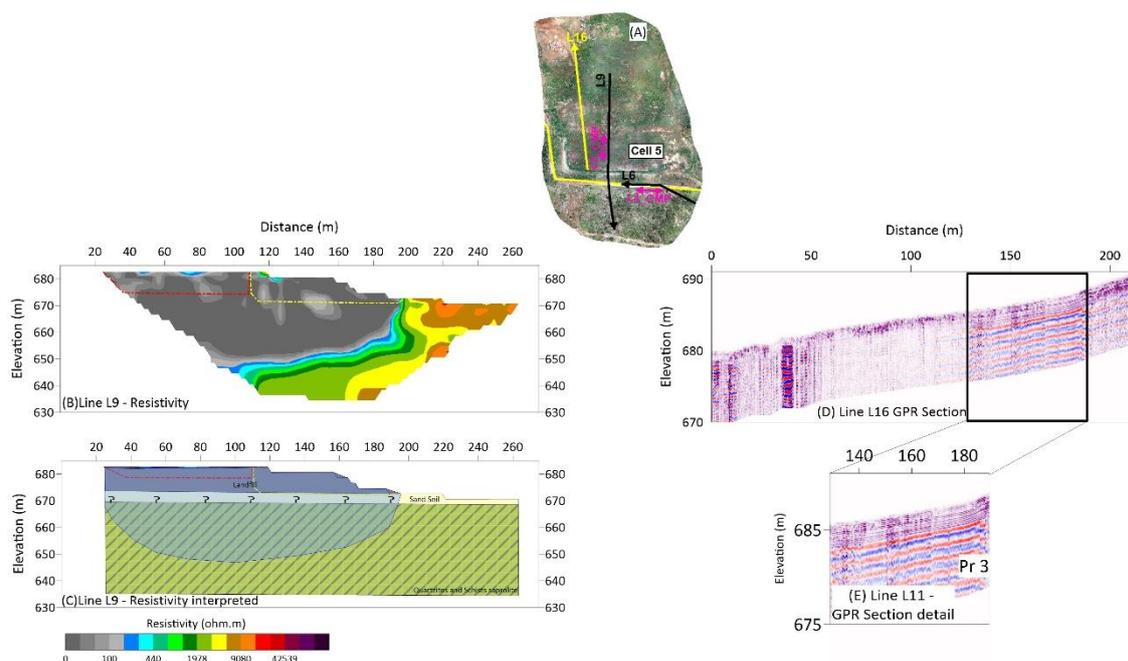
Sobre a célula 5, ao sul da área do aterro controlado, com presença de geomembrana, foram executada as Linha L9 de elétrica e a seção 16 de GPR (que se inicia aos 100m da L9 de elétrica), **Figura 5-11**. Essas seções foram adquiridas de norte a sul a primeira e de sul para norte a segunda, conforme Fig. 2.



**Figura 5-10** (A) Referência de localização. (B) Detalhe da acumulação de chorume no sopé do talude leste da célula 2. (C) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR. (D) Seção de resistividade interpretada. (E) Seção de GPR (Commom - Offset) (com início a 96m do início da seção de eletrorresistividade) sobre a célula de resíduos encerrada. (F) Detalhe do padrão de reflexão observado

O resultado da inversão elétrica mostra valores de baixa resistividade (100 ohm.m) abaixo da base da célula, que não ultrapassa 10m de profundidade, e além dela, indicando percolação vertical (do lixiviado produzido que atualmente alcança profundidades em torno de 40m).

O radargrama evidencia o padrão Pr3, com refletos horizontalizados contínuos, de alta amplitude, com porções de baixa amplitude devido a atenuação do sinal GPR causada pela presença dos líquidos oriundos da decomposição dos materiais orgânicos.



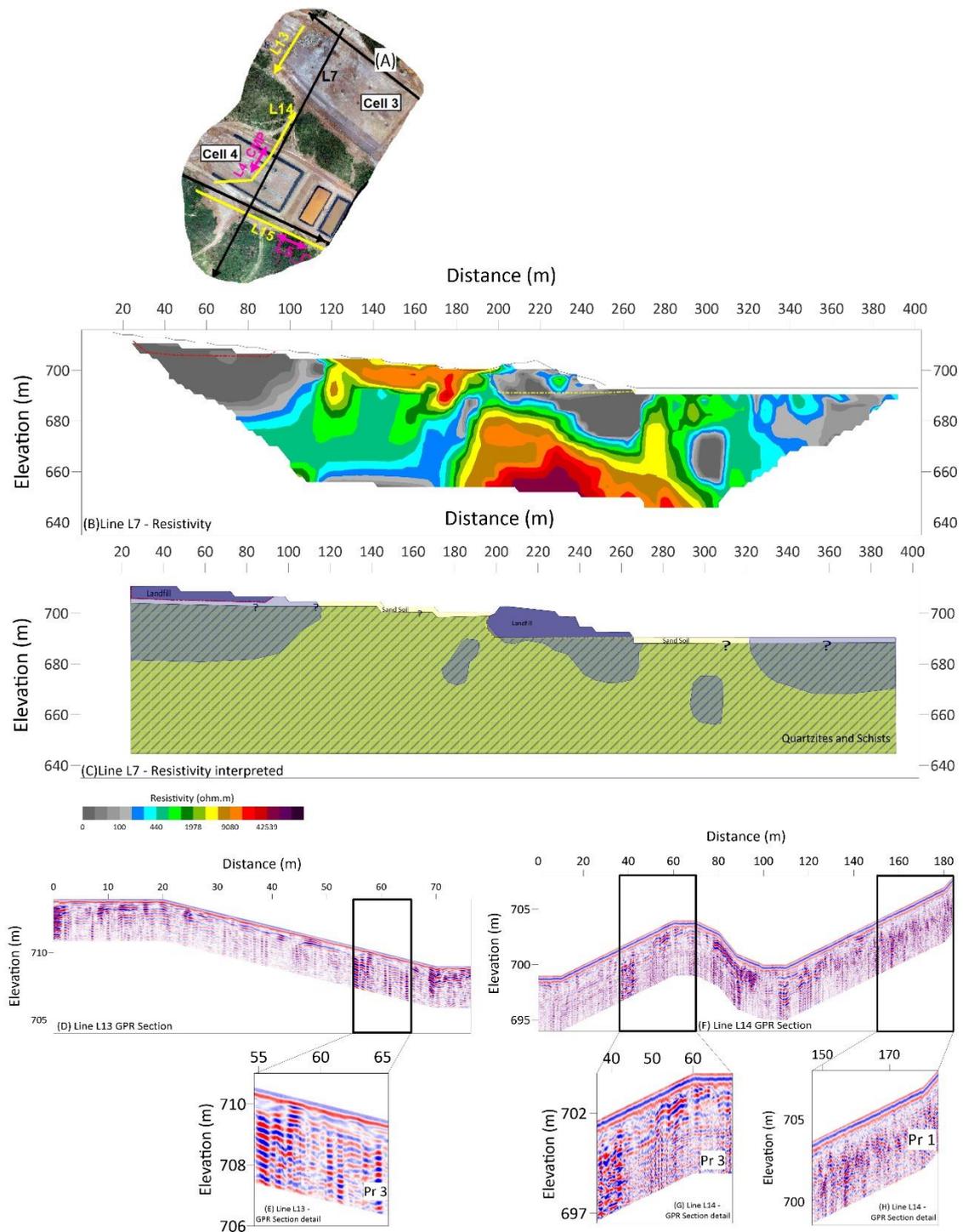
**Figura 5-11** (A) Referência da localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR. (C) Seção de resistividade interpretada. (D) Seção de GPR (Common - Offset) (com o mesmo início da seção de eletroresistividade) sobre a célula de resíduos encerrada. (E) Detalhe do padrão de reflexão observado

A Linha L7 de elétrica foi executada sobre uma célula sem geomembrana (Célula 3) e uma com (Célula 4) de norte a sul, e as seções de GPR que contemplam essa análise são a L13 e a L14, [Figura 5-12](#).

O resultado da inversão elétrica mostra valores de baixa resistividade (< 100 ohm.m) abaixo da base de ambas as células, que estão não ultrapassam mais de 10m de profundidade. Abaixo da célula 3, há percolação vertical e lateral (ao menos 20m sentido sul) do lixiviado produzido que atualmente alcança profundidades em torno de 30m.

Para a Célula 4, o resultado da inversão elétrica mostra valores de baixa resistividade (<100 ohm.m) abaixo da base de ambas as células, que estão não ultrapassam mais de 10m de profundidade. Abaixo da célula, há percolação vertical do lixiviado produzido que atualmente alcança profundidades em torno de 15m, o que indica que o líquido lixiviado não está contido pela geomembrana.

As seções de GPR em ambas as células evidenciam a deposição de resíduos, com refletos horizontalizados contínuos, de alta amplitude, com porções de baixa amplitude devido a atenuação do sinal GPR (Pr3) causada pela presença dos líquidos oriundos da decomposição dos materiais orgânicos.

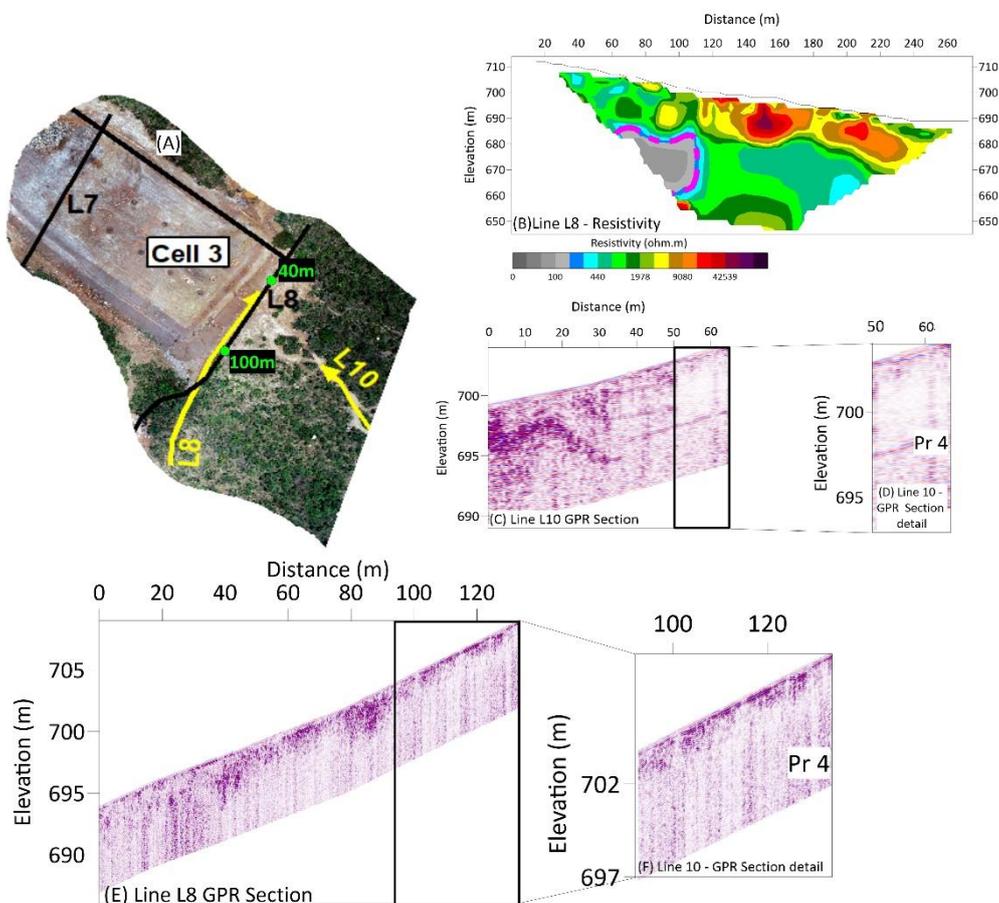


**Figura 5-12** (A) Referência da localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR. (C) Seção de resistividade interpretada. (D) e (F) GPR (Common - Offset) Seções sobre a célula de lixo. (E), (G) e (H) Detalhe do Padrão de reflexão observado.

## PERCOLAÇÃO LATERAL

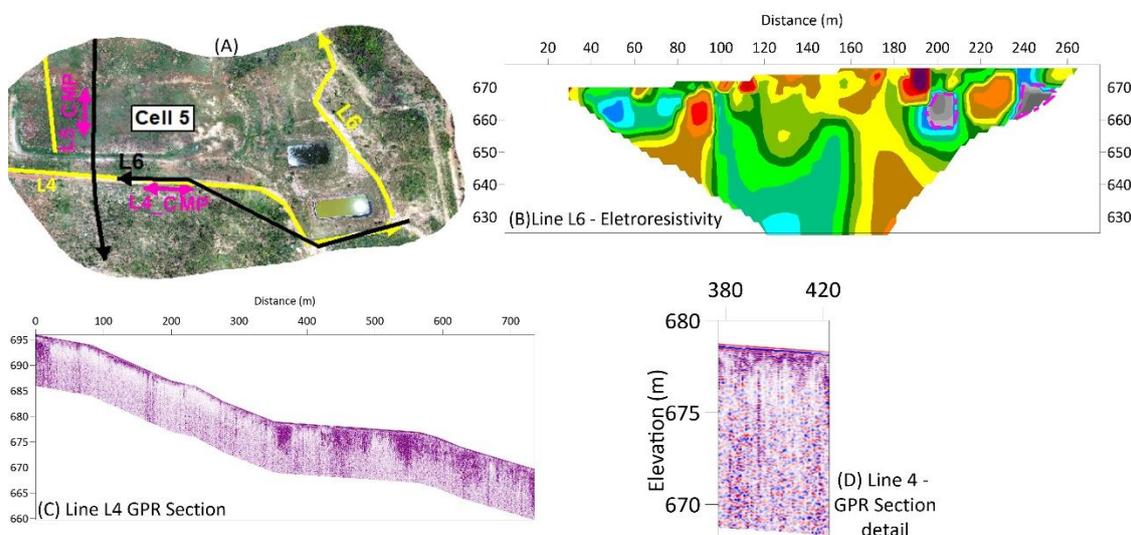
Além do subsolo diretamente abaixo das células de disposição de resíduos, foi possível identificar porções da área para onde o líquido lixiviado, oriundo de células adjacentes ou de lixo espalhado aleatoriamente no aterro, está percolando.

De norte para sul, a célula 3, sem utilização de manta, tem levantamentos geofísicos em sua borda mostrando que o lixiviado está migrando para leste. Zonas de baixa resistividade na Linha 8 (L8) de caminhamento elétrico (<100 ohm.m) indicam que o chorume gerado na célula a montante não está contido (Figura 5-13). Para endossar a hipótese, a seção de GPR (L10), adquirida de leste a oeste, apresenta da posição 50m em diante atenuação abrupta no sinal do radar, o que sugere a presença de materiais geológicos ou antrópicos com relevante condutividade elétrica, como o chorume. Assim como a seção de GPR (L8), a partir de 80m, quando no mesmo intervalo em questão, também apresenta refletores com sinal atuado, sugerindo o mesmo



**Figura 5-13** (A) Referência de localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR interpretada. (C) e (E) Seções GPR (Common - Offset). (D) e (F) Detalhe do Padrão de reflexão observado.

Em seguida, a jusante da célula 5 com aplicação de geomembrana e das lagoas de chorume desativadas no aterro controlado, a linha de caminhamento elétrico (L6) apresenta pontos isolados com baixa resistividade elétrica, coincidentes nos segmentos diretamente a sul das lagoas e no final da linha no sopé do talude da célula, o que pode indicar a migração do lixiviado para sul (Figura 5-14)



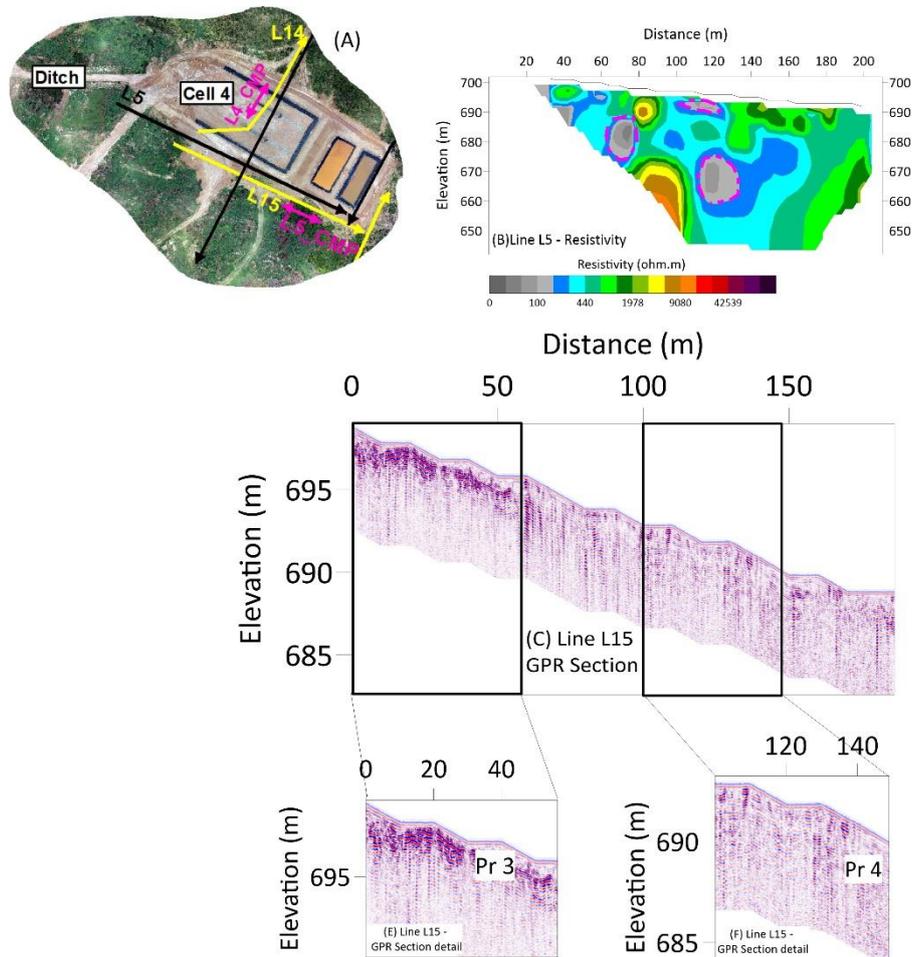
**Figura 5-14** (A) Referência de localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR interpretada. (C) Seção GPR (Common - Offset) section). (D) Detalhe do Padrão de reflexão observado.

Há, ainda, indícios de contaminante espalhado por áreas do aterro, as quais não chegaram a ser células de deposição de resíduos oficialmente, mas as imagens históricas, disponíveis nas plataformas de imageamento por satélite, mostram que por vezes foram dispostos resíduos aleatoriamente e cobertos por uma camada de terra. Esse manejo irregular gera, além das áreas contaminadas por acúmulo de grandes quantidades de resíduos, a possível contaminação de outras porções que poderiam estar inertes, Figura 5-15.

Neste caso, o início da Linha L5 de resistividade elétrica pode estar detectando esses resíduos espalhados na área, com zonas de baixa resistividade ( $< 100 \text{ ohm.m}$ ) indicando migração para leste, logo, o que foi observado anteriormente sobre os líquidos lixiviados da Célula 4, é possível inferir que a detecção dos baixos valores resistivos da Linha L5 não sejam atribuídos à lixiviados oriundos dessa célula e sim de resíduos espalhados.

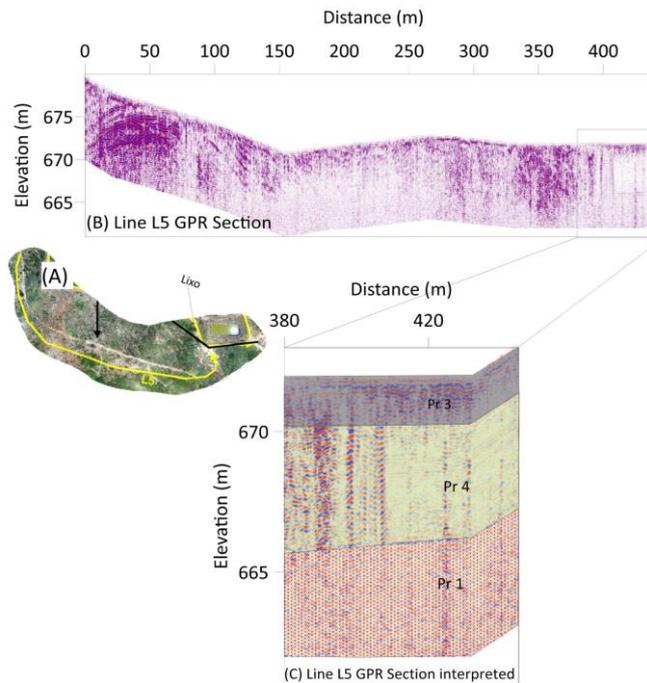
As Linhas de GPR também detectaram valores de alta condutividade, ocasionando atenuação do sinal, no entanto neste caso, refere-se aos resíduos dispostos aleatoriamente em pequenas camadas em momentos distintos e conforme conveniência dentro da área do aterro controlado. Os refletores horizontalizados e de

alta amplitude mostram tratar-se de resíduos dispostos diretamente naquele segmento da seção.



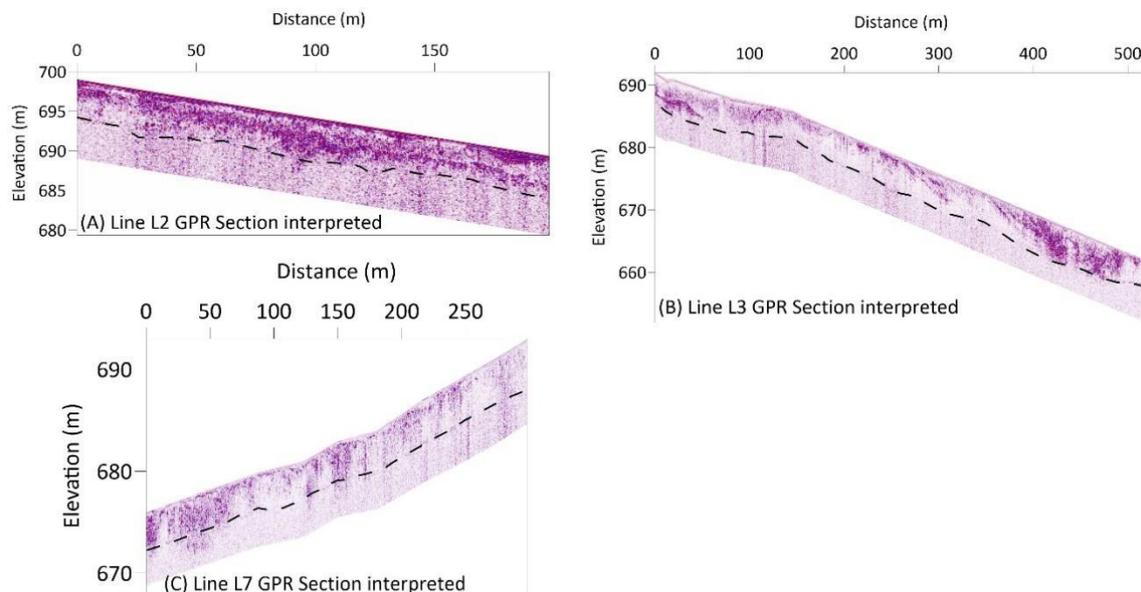
**Figura 5-15** (A) Referência de localização. (B) Seção de resistividade na mesma linha que a seção de GPR interpretada. (C) Seção de GPR (Common - Offset) section). (D) e (E) Detalhe do Padrão de reflexão observado.

Outras seções de GPR adquiridas nas dependências da área do aterro apresentaram valores de alta condutividade, ocasionando atenuação do sinal, como na seção L5 em que no momento do levantamento de campo foi encontrado disposto ao final da linha de aquisição resíduos dispostos a céu aberto, e que teve suas consequências representadas no referido radargrama [Figura 5-16](#).



**Figura 5-16** (A) Referência de localização. (B) Seção de GPR (Common - Offset) section). (C) Padrão de reflexão observado

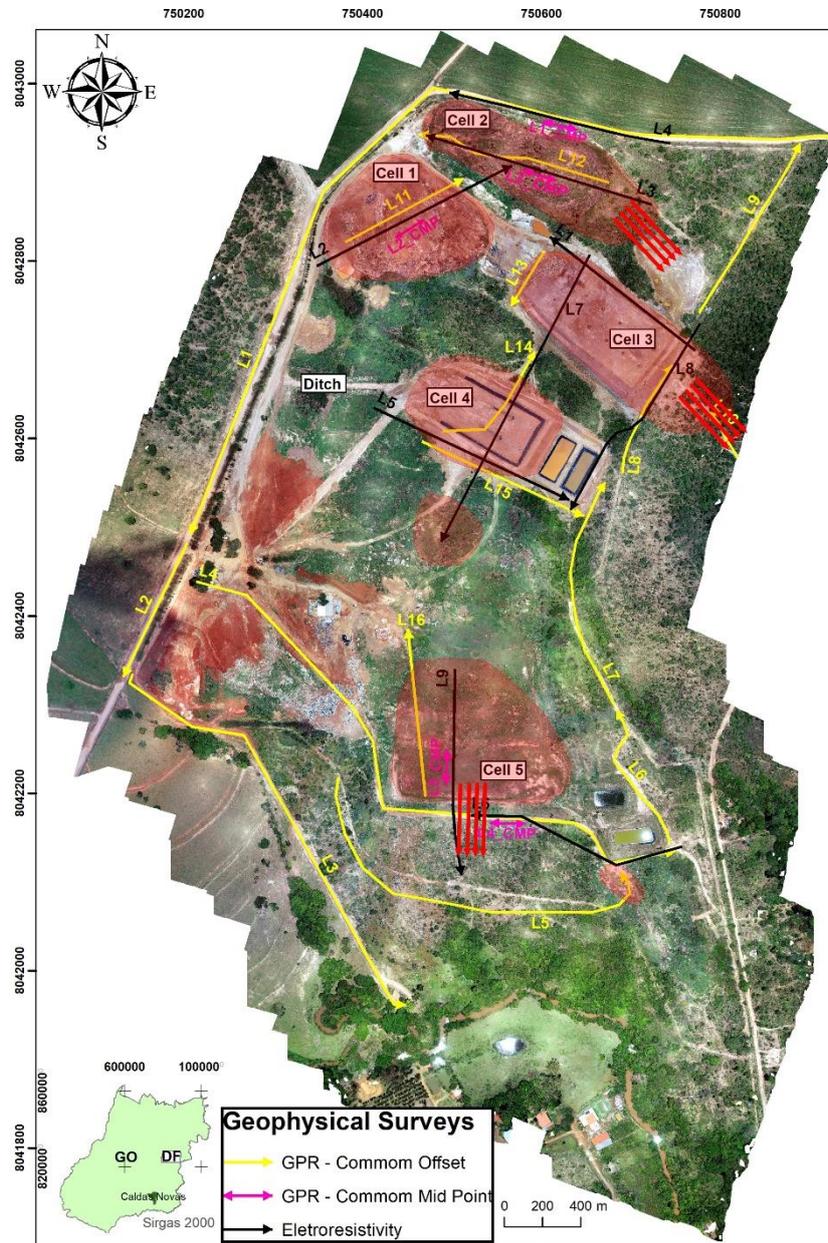
Os resultados obtidos com as seções de GPR permitiram ainda identificar uma singularidade entre eles que, um refletor horizontalizado com variações discretas de cota, que pode indicar o nível de água (N.A) em torno de 5 a 6m de profundidade. As seções Line L2, Line L3, e L7 são algumas delas, [Figura 5-17](#). [Costa \(2011\)](#) mostra que a porção central da área do aterro tem uma profundidade entre 2 a 5 metros.



**Figura 5-17** (A), (B) and (C) Seções de GPR com interpretação do nível de água

## ÁREAS CONTAMINADAS

Reunindo as informações adquiridas, foi possível observar que a maior parte da gleba onde está instalado o aterro controlado de Caldas Novas tem contaminação por chorume, que tende a migrar para sudeste, sentido do declive da vertente (Figura 5-18).



**Figura 5-18** Localização das áreas contaminadas observadas nas aquisições geofísicas, bem como a direção de migração da pluma de contaminação.

## 5.4 CONCLUSÕES

O então aterro controlado de Caldas, desde meados dos anos 2000 apresenta registros de deposição irregular de resíduos sólidos. O manejo na área conduzido por muitos anos de maneira vulgar e sem atenção às normas técnicas

acarretaram diversos problemas que retornam às responsabilidades do poder público, dentre elas as de cunho ambiental.

Os resultados mostraram percolação de lixiviado em todas as células investigadas, com ou sem geomembrana. Nas células mais antigas, o deslocamento do lixiviado apresenta escalas maiores, tanto em profundidade quanto lateralmente, como nas células 2 e 3 em que é possível observar percolação sentido sudeste.

Na célula 5 com geomembrana, foi observado apenas a percolação vertical do lixiviado, apresentando apenas situações de baixa resistividade pontuais a sul. O mesmo ocorre com a célula 4, somente foi verificada continuidade dos valores baixos de resistividade em profundidade.

Logo, o uso da geomembrana não tem se mostrado eficiente em nenhum dos casos. Seja por defeitos na aplicação, por puncturas ou rasgos ocasionados pela operação, ou porque sabe-se que nada é estritamente impermeável em um sentido absoluto. (BARAN,2021). Muitos autores já estudaram o comportamento difusivo do lixiviado através dos revestimentos de fundo em aterros sanitários como Lacerda et al. (2012), Silveira (2014), Paz (2015), e Fonseca (2017) também dedicaram suas pesquisas à análise do transporte difusivo pelo revestimento de fundo de aterros sanitários.

O contexto de qualidade ambiental da área é preocupante, a medida em que se tem na região um nível de água raso (5 a 6m), conforme informações obtidas nos radargramas, a profundidade em que estão os contaminantes (30 a 40m) mostra, portanto já ter atingido o nível de água. Além disso, as linhas adquiridas cercam toda a área e mostram contaminação em toda sua extensão.

Na ausência de poços de monitoramento e de outras formas de investigação direta na área de estudo, a caracterização geológica, juntamente com a aplicação das técnicas geofísica demonstram ser uma alternativa para caracterização e monitoramento em regiões de disposição de resíduos sólidos.

É imperativo que seja designado um plano de recuperação ambiental a começar pelo refinamento deste mapeamento de informações com a execução de ensaios diretos como furos de sondagem para a confirmação dos locais de contaminação e aquisição de amostras de água e solo nos entornos para aferição do potencial de percolação do lixiviado, coleta de amostras para analisar quais as características do contaminante, checagem do nível de água, e cessão das atividades nessa área, visto que os espaços úteis já se exauriram e persistir em aterrar lixo em um local não licenciável conforme NBR 8419/1985, é endossar os erros cometidos anteriormente.

## 5.5 REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. 2021. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso: 20 de Maio, 2022.

ANNAN AP, COSWAY SW, SIGURDSSON T. 1994. GPR for snow water content. In: 5th International Conference on GPR. Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, pp: 465-475.

ANNAN AP. 1996. "Transmission Dispersion and GPR," Journal of Environmental and Engineering Geophysics 1: 125-136.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1985. NBR 8419 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro.

BACELLAR LAP, CATAPRETA CAA. 2010. Emprego de eletrorresistividade para delimitação de pluma de contaminação por líquidos lixiviados no aterro sanitário de Belo Horizonte. Águas Subterrâneas 24(1): 46-58. DOI: 10.14295/ras.v24i1.20970

BARAN, CT. Modelagem do transporte de contaminantes em sistemas de impermeabilização de fundo em múltiplas camadas compostas por argila compactada e geomembrana. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

BRASIL. Decreto. CÓDIGO DAS ÁGUAS, Coleção de Leis do Brasil - 1934, v. 04, p.679.

BRASIL. Constituição. CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília DF.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional - SNIS. 2019. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília. Available online: [www.snis.gov.br](http://www.snis.gov.br) (accessed on 07/12/2021).

CANATA RE, FERREIRA FJF, STEVANATO R, SALVADOR, FAZ, SOUZA FILHO OA. 2018. Integração dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético Aterro Sanitário de Guaratuba-PR. Boletim Paranaense de Geociências 74(1): 11-27. DOI: 10.5380/geo.v74i1.45234

CAVALCANTI, SS, SATO, HK, LIMA, OAL. 2002. Geofísica Elétrica na Caracterização da Hidrologia Subterrânea na Região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 19, p. 155-167, 2002.

CETESB. Companhia de tecnologia de saneamento ambiental. 2001. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. GTZ.2 ed. São Paulo. 389 p.

CHRISTENSEN TH, KJELDSEN P, BJERG PL, JENSEN DL, CHRISTENSEN JB, BAUN A, HERON, G. 2001. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry, 16(7-8): 659–718. DOI: 10.1016/S0883-2927(00)00082-2 .

EDWARDS LS. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP: Geophysics, 42, 1020–1036.

ELIS VR, ZUQUETTE LV. 2002. Caracterização geofísica de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos urbanos. Revista Brasileira de Geociências 32(1): 119-134.

LOKE MH, DAHLIN T. 2002. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. Journal of Applied Geophysics 49(3): 149-162. DOI: 10.1016/S0926-9851(01)00106-9

FITTS, Charles R. Groundwater science. Academic Press, 692 p, 2013

MOREIRA MLO, MORETON LC, ARAÚJO VA, LACERDA FILHO JV, COSTA HF. 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC –FUNMINERAL. Programa Geologia do Brasil: Integração, Atualização e Difusão de Dados de Geologia do Brasil. Programa Geologia e Mineração do Estado de Goiás: Geração e Disponibilização de Informações Geológicas e do Potencial Mineral de Goiás, 143 pp

MOREIRA CA & BRAGA ACO. 2009. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. Revista de Engenharia Sanitária em Ambiental 14(2): 257-264. DOI: 10.1590/S1413-41522009000200013

OLOFSSON B, JERNBERG H, ROSENQVIST A. 2006. Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modeling. *Environmental Geology* 49(5):720-732. DOI: 10.1007/s00254-005-0117-9

POMPOSIELLO C, DAPENA C, FAVETTO A, BOUJON P. 2012. Application of geophysical methods to waste disposal studies. In Xiao-Ying Yu (Ed), *Municipal and Industrial Waste Disposal*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2012. DOI: 10.5772/29615.

PORSANI JL, FILHO WM, ELIS VR, SHIMELES F, DOURADO JC, MOURA HP. 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 55(3-4): 199–209. DOI:10.1016/j.jappgeo.2003.11.001 .

JOL, HM. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam.

JOSÉ TAVARES ARARUNA JÚNIOR; PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA PIRES ; DÉBORA LOPES PILOTTO DOMINGUES ; TÁCIO MAURO PEREIRA DE CAMPOS . The Use of Ground Penetrating Radar in Municipal Solid Waste Landfill Geotechnical Investigation. *Journal of Civil Engineering and Architecture (Print)*, v. 10, p. 822-827, 2016.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. (2009). *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de textos.

PARK JK, NIBRAS M, JUNE M. 1987. Mass flux of organic chemicals through polyethylene geomembranes. *Water Environment Research* 65(3): 228 227–237.

ROWE RK. (1998). Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. *Sixth Int. Conf. Geosynth.*

ROWE RK, HRAPOVIC L, KOSARIC N. 1995. Diffusion of Chloride and Dichloromethane Through an HDPE Geomembrane. *Geosynthetics International*, 2(3), 507–536. DOI:10.1680/gein.2.0021

SANGAM HP, ROWE, RK. 2001. Migration of dilute aqueous organic pollutants through HDPE geomembranes. *Geotext. Geomembranes*, 19: 329–357.

SPLAJT T, FERRIER, G, FROSTICK LE. 2003. Monitoring of Landfill Leachate Dispersion Using Reflectance Spectroscopy and Ground-Penetrating Radar. *Environmental Science & Technology*, 37(18), 4293–4298. DOI:10.1021/es020133f

YILMAZ O. 2001. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa

## 6. CONCLUSÕES

A eletrorresistividade se mostrou eficiente na delimitação da pluma de contaminação. A comparação dos resultados mostra que os modelos de resistividade com arranjos polo-dipolo mostram resultados satisfatórios e melhor resolução em profundidade em relação ao Dipolo - Dipolo e Schlumberger.

A zona com refletores bem marcados nas seções do georadar está relacionada com a elevação da resistividade elétrica do meio, permitindo assim subsidiar a interpretação de acordo com a informação geológica disponível.

Os resultados mostraram percolação de lixiviado em todas as células investigadas, com ou sem geomembrana. Nas células mais antigas, o deslocamento do lixiviado apresenta escalas maiores, tanto em profundidade quanto lateralmente, como nas células 2 e 3 em que é possível observar percolação sentido leste.

O contexto de qualidade ambiental da área é preocupante, a medida em que se tem na região um nível de água raso (5 a 6m), conforme informações obtidas nos radargramas, a profundidade em que estão os contaminantes (30 a 40m) mostra, portanto já ter atingido o nível de água. Além disso, as linhas adquiridas abrangem toda a área e mostram contaminação em toda sua extensão

É imperativo que seja designado um plano de recuperação ambiental a começar pelo refinamento deste mapeamento de informações com a execução de ensaios diretos como furos de sondagem para a confirmação dos locais de contaminação e aquisição de amostras de água e solo nos entornos para aferição do potencial de percolação do lixiviado, coleta de amostras para analisar quais as características do contaminante, checagem do nível de água, e cessão das atividades nessa área, visto que os espaços úteis já se exauriram e persistir em aterrar lixo em um local não licenciável conforme NBR 8419/1985, é endossar os erros cometidos anteriormente e este trabalho cumpriu seu objetivo em subsidiar com informações pertinentes ao tema as futuras tomadas de decisão dos órgãos competentes.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, FFM, HASUI Y, BRITO-NEVES BB, FUCK RA. 1997. Províncias estruturais brasileiras. In: Simpósio Geologia Nordeste, 8, 1977. Campina Grande. Anais. Recife: SBG, p. 363- 391.

ALMEIDA L, RESENDE L, RODRIGUES AP, CAMPOS JEG. 2006. Secretaria de Indústria e Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. Hidrogeologia do Estado de Goiás. Goiânia.

ANNAN AP. 1996. Transmission Dispersion and GPR. Journal of Environmental and Engineering Geophysics 1: 125-136.

ANNAN,, A.P. 2002. GPR History, Trends, and Future Developments. Subsurface Sensing Technologies and Applications. 3, 253–270. <https://doi.org/10.1023/A:1020657129590>

ANNAN AP. 2005. Ground-penetrating radar. In D.K. Butler (ed.) Near surface geophysics. Investigations in Geophysics 13. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK. p. 351–432.

ARCHIE GE.1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Transactions of the AIME, 146(01), 54–62.

BACELLAR LdeAP, CATAPRETA CAA. Emprego de eletrorresistividade para delimitação de pluma de contaminação por líquidos lixiviados no aterro sanitário de Belo Horizonte. 2010. Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 24, p. 46-58. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/20970/16326>>. Acesso em: 12 /07/2021.

BIELLA CA. 2009. A degradação ambiental como consequência do crescimento urbano sem planejamento no município de Caldas Novas - Go. In: XIII Simposio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, Viçosa - MG. XIII Simposio Brasileiro de Geografia Física Aplicada.

BORGES WR. 2002. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo,

São Paulo, 2002. DOI: 10.11606/D.14.2002.tde-26042004-112913. Acesso em: 2020-02-10.

BRAGA ACO. 2016. Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em hidrogeologia. São Paulo: Oficina de Textos,

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília DF.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Mapa Hidrogeológico do Brasil (Escala 1:2.500.000). Relatório Final. Recife: DNPM/CPRM, 1981. v.1 e 2.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília: 2019. Disponível em <[www.snis.gov.br](http://www.snis.gov.br)>. Acessado em: 12/07/2021.

CAMPOS JEG, FREITAS-SILVA FH. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Parte I. Vol II. IEMA-SEMATEC/Universidade de Brasília. (Inédito). 66p

CAMPOS, JEG, Tröger U, HAESBAERT FF. Águas Quentes de Caldas Novas, Goiás Notável ocorrência de águas termais sem associação com magmatismo. In: Winge,M.; Schobbenhaus,C.; Berbert-Born,M.; Queiroz,E.T.; Campos,D.A.; Souza,C.R.G. ; Fernandes,A.C.S.. (Org.). Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil. 1ed.Rio de Janeiro: CPRM - CEDOC, 2009, v. 2, p. 177-190.

CANATA RE, FERREIRA FJF, STEVANATO R, SALVADOR FAZ, SOUZA FILHO OA. 2018. Integração dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético Aterro Sanitário de Guaratuba-PR. Boletim Paranaense de Geociências, v. 74, p. 11-27.

CAVALCANTI SS, SATO HK, LIMA OAL. 2002. Geofísica Elétrica na Caracterização da Hidrologia Subterrânea na Região do Aterro Metropolitano Centro, Salvador, Bahia. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 19, p. 155-167.

CAVALCANTI SS, SATO H K, LIMA OAL. 2001. Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do aterro metropolitano centro, Salvador, Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 19, n. 2, p. 155–168.

CAVALCANTI, MM. 2013. Aplicação de métodos geoeletricos no delineamento da pluma de contaminação nos limites do aterro controlado do Jokey Clube de Brasília. 111 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas)—Universidade de Brasília, Brasília.

CHRISTENSEN TH, KJELDSEN P, BJERG PL, JENSEN DL, CHRISTENSEN JB, BAUN A, HERON G. 2001. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16(7-8), 659–718. DOI:10.1016/s0883-2927(00)00082-2.

COSTA, RA. Zoneamento ambiental da área de expansão urbana da Caldas Novas GO: procedimentos e aplicações. 2008. 216 f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

ELIS VR, MENDONÇA CA, PORSANI, JL, STROBINO EdeF. 2008. O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósito de resíduos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, p. 317-325.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2013. 3. ed. Rio de Janeiro.

FERRER RAMOS N. 2019. Assessment of a groundwater system under global change scenarios: the case of Kwale (Kenya). Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental. Available at: <<http://hdl.handle.net/2117/327406>>

HERMOZILHA H, GRANGEI, C, MATIAS MS. 2010. An integrated 3D constant offset GPR and resistivity survey on a sealed landfill — Ilhavo, NW Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, 70(1), 58–71.

GANDOLFO, OCB, GALLAS JDF. O arranjo polo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, p. 227-235, 2007a.

GANDOLFO, OCB. 2007b. Um estudo do imageamento elétrico na investigação rasa. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Universidade de São Paulo, São Paulo.

GREENHOUSE JP. 1991. Environmental geophysics: it's about time. *Geophysics: The Leading Edge*, 10: 32–34.

GUEDES, VJCB, LIMA VBO, BORGES WR. 2019. Espessura do maciço de resíduos do aterro Jockey Clube de Brasília a partir de dados de eletrorresistividade. In: *Geosudeste*, Campinas, São Paulo. GEOSUDESTE.

JOL HM. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam, 509 p.

JOSÉ TAVARES ARARUNA JÚNIOR; PATRÍCIO JOSÉ MOREIRA PIRES ; DÉBORA LOPES PILOTTO DOMINGUES ; TÁCIO MAURO PEREIRA DE CAMPOS . The Use of Ground Penetrating Radar in Municipal Solid Waste Landfill Geotechnical Investigation. *Journal of Civil Engineering and Architecture (Print)*, v. 10, p. 822-827, 2016.

KAYA MA, ÖZÜRLAN G, ŞENGÜL E. 2007. Delineation of soil and groundwater contamination using geophysical methods at a waste disposal site Çanakkale, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 135(1- -3), 441–446. 4

KEAREY P, BROOKS M, HILL I. 2009. *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de textos, 438 p.

KJELDSSEN P, BARLAZ MA, ROOKER AP, BAUN A, LEDIN A, CHRISTENSEN TH. 2002. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297–336. DOI:10.1080/10643380290813462

KODA E, OSIŃSKI P. 2016. Site Investigation of an Industrial Landfill for the Purpose of a Remedial Works Project. *Geo-Chicago 2016*. DOI:10.1061/9780784480168.073

KODA E, TKACZYK A, LECH M, OSIŃSKI, P. 2017. Application of Electrical Resistivity Data Sets for the Evaluation of the Pollution Concentration Level within Landfill Subsoil. *Applied Sciences*, 7(3), 262. DOI:10.3390/app7030262

KOPPEN W. *Climatologia: com um studio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.

LACERDA FILHO JOFFRE VALMÓRIO DE. 1999. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal: Organizado Por Joffre Valmório de Lacerda Filho, Abelson Rezende e Aurelene da Silva. 1:500.000. Goiânia: CPRM. (Conv. CPRM/METAGO S.A./UnB).

LAUREANO AT, SHIRAIWA S. 2008. Ensaio Geofísicos no Aterro Sanitário de Cuiabá – MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, (2008) 26(2): 173-180.

LATRUBESSE EM, CARVALHO TM. 2006. Mapa Geomorfológico do Estado de Goiás. (Cartas, mapas ou similares/Mapa).

LIU Y, LIU Y, LI Y, FU X, GUO H, MENG R, LU W, ZHAO M, WANG H. 2016. Health risk impacts analysis of fugitive aromatic compounds emissions from the working face of a municipal solid waste landfill in China. *Environment International* 97(1): 15-27. DOI: 10.1016/j.envint.2016.10.010

LOKE MH & BARKER RD. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.

LOKE MH. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. 2001. 129p. Disponível em: <http://www.geotomosoft.com>, acessado em 30/11/2020.

LOKE MH. 2004. Res2Dinv versão 3.54 for Windows 98/Me/2000/NT/XP. Rapid 2D Resistivity and IP Inversion using the least-square method. Software Manual. P 133. Disponível em :<http://www.goelectrical.com>.

LOPES DD, SILVA SMCP, FERNANDES F, TEIXEIRA RS, CELLIGOI A, DALL'ANTÔNIA LH. 2012. Geophysical technique and groundwater monitoring to detect leachate contamination in the surrounding area of a landfill – Londrina (PR – Brazil).

Journal of Environmental Management, 113, 481–487.  
DOI:10.1016/j.jenvman.2012.05.028

MORAIS F, BACELLAR LAP, ARANHA PRA. 2007. Study of flow in vadose zone from electrical resistivity surveys. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 2, p.115-122.

MOREIRA CA, BRAGA ACO. 2009. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental* 14(2): 257-264. DOI: 10.1590/S1413-41522009000200013

MOREIRA MLO, MORETON LC, ARAÚJO VA, LACERDA FILHO JV, COSTA HF. 2004. GEOLOGIA do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Goiânia: CPRM/SIC-FUNMINERAL.

MOREIRA CA, DOURADO JC. 2007. Monitoramento da atenuação natural de pluma de contaminação pelo método de radar de penetração no solo (GPR). *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(4), 389–398. DOI:10.1590/S0102-261X2007000400003

MOREIRA CA, et al. 2013. Caracterização geofísica em aterro de resíduos sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica. *Geologia USP - Serie Científica*, v. 13, n. 1, p. 25-34. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/74764>>.

NBR, ABNT. NBR 8849 Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos - 1985.

NBR, ABNT. NBR 8419 Apresentação de Projetos de Aterros Sanitarios de Residuos Solidos Urbanos. 1992.

NBR, ABNT. NBR 15935 Investigações ambientais - Aplicação de métodos geofísicos. 2011.

OLOFSSON B, JEMBERG H, ROSENQVIST A. 2005 Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modeling. *Environmental Geology*.

OLAOJO AA, OLADUNJOYE MA, SANUADE OA. 2017. Geoelectrical assessment of polluted zone by sewage effluent in University of Ibadan campus southwestern Nigeria. *Environ Monit Assess*. 2017 Dec 15;190(1):24. doi: 10.1007/s10661-017-6389-1. PMID: 29247326.

OLABODE OP, SAN LH AND RAMLI MH. 2020. Analysis of Geotechnical-Assisted 2-Electrical Resistivity Tomography Monitoring of Slope Instability in Residual Soil of Weathered Granitic Basement. *Front. Earth Sci.* 7:580230. DOI: 10.3389/feart.2020.580230

POMPOSIELLO C, FAVETTO A, OSTERA H. 2004. Resistivity imaging and ground penetrating radar survey at Gualaguaychu landfill, Entre Rios Province, Argentina: Evidence of a contamination plume. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth, In proceedings: The 17th Workshop. Hyderabad, India, 18–23 October.

POMPOSIELLO C, DAPENA C, FAVETTO A, BOUJON P. 2012. Application of geophysical methods to waste disposal studies. In Xiao-Ying Yu (Ed), *Municipal and Industrial Waste Disposal*, ISBN: 978–953–51-0501-5, DOI: 10.5772/29615.

PORSANI J L, FILHO WM, ELIS VR, SHIMELES F, DOURADO JC, MOURA HP. 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 55(3-4), 199–209. DOI:10.1016/j.jappgeo.2003.11.001.

PUJARI PR, PARDHI P, MUDULI P, HARKARE P, NANOTI MV. 2007. Assessment of Pollution Near Landfill Site in Nagpur, India by Resistivity Imaging and GPR. *Environmental Monitoring and Assessment*, 131(1-3), 489–500. DOI:10.1007/s10661-006-9494-0

RANGEL RC, PORSANI JL, BORTOLOZO CA, HAMADA LR, OLIVEIRA GS, STANGARI MC, SANTOS EC. 2017. Geoelectrical analysis from electroresistivity and TDEM data applied to geological and hydrogeological studies in Taubaté Basin: Preliminary results. In: *Fifteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 2017, Rio de Janeiro. Fifteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society.

REYNOLDS JM. 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, Chichester. 2ª edição, 289p.

SISINNO CL, MOREIRA JC. 1996. Avaliação da Contaminação e Poluição Ambiental na Área do Aterro Controlado do Morro do Céu (Niterói-RJ. Cadernos de Saúde Pública (FIOCRUZ) , v. 12, n.4, p. 37-45.

SOARES DE SÁ H, ROBERTO ELIS V. 2017. Aplicação de imageamento elétrico multi-eletrodos para auxílio na locação de perfuração de poços tubulares – estudo de casos em aquíferos fraturados. Águas Subterrâneas. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28738>

SOUSA, Fade, RODRIGUES SC. 2018. Caracterização física de Iporá-go. Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais,V. 7, p. 121-141.

STEEPLES D. 1999. Uses and techniques of environmental geophysics. Geophysics: The Leading Edge, 10 (9): 30–31.

SZALAI S. SZARKA L. 2008. On the classification of surface geoelectrical arrays. Geophysical Prospecting, 56: 159–175.

TELFORD WM, GELDART LP, SHERIFF RE. 1990. Applied Geophysics. 2nd ed. Cambridge University Press, New York. 859p.

TSO CHM, et al. 2020. Integrated hydrogeophysical modelling and data assimilation for geoelectrical leak detection. Journal of Contaminant Hydrology, v. 234, n. July, p. 103679.

VALENTE, CR.1986. Projeto mapas metalogenéticos e de previsão de recursos minerais; carta metalogenética; carta de previsão de recursos minerais; carta de previsão para planejamento de ações governamentais - Escala 1:250.000 Folha SE.22-X-B. Goiânia. Brasília, DNPM.

XAVIER FF. Mapeamento Geométrico no aterro sanitário do município de Blumenau, SC. 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental ABGE, Florianópolis, SC.

ZOHDY AAR. 1989. A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics, 54: 245–253.

