



UFRR

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RORAIMA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS

FLAIDER ALVES PIMENTEL

**GEOFÍSICA E MORFOMETRIA EM TERRENOS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS NA PORÇÃO SETENTRIONAL DO ESTADO DE RORAIMA**

BOA VISTA, RR

2020

FLAIDER ALVES PIMENTEL

**GEOFÍSICA E MORFOMETRIA EM TERRENOS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS NA PORÇÃO SETENTRIONAL DO ESTADO DE RORAIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais, da Universidade Federal de Roraima, para obtenção do título de Mestre em Recursos Naturais. Área de concentração: Resíduos Sólidos e Meio Ambiente.

Orientadora: Prof. Dra. Lena Simone Barata Souza
Coorientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva

BOA VISTA, RR

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Roraima

P644g Pimentel, Flaider Alves.
Geofísica e morfometria em terrenos de disposição de
resíduos sólidos na porção setentrional do estado de Roraima /
Flaider Alves Pimentel. – Boa Vista, 2020.
137 f. : il.

Orientadora: Prof. Dra. Lena Simone Barata Souza.
Coorientador: Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Roraima,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais.

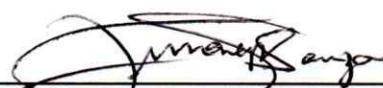
1 – Resíduo Sólido. 2 – Lixiviado. 3 – Morfometria. 4 –
Sondagem Elétrica Vertical. 5 – Roraima. I – Título. II – Souza,
Lena Simone Barata (orientadora). III – Silva, Adriano Frutuoso
da (coorientador).

CDU – 528.8(811.4)

FLAIDER ALVES PIMENTEL

**GEOFÍSICA E MORFOMETRIA EM TERRENOS DE DISPOSIÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS NA PORÇÃO NORTE DO ESTADO DE RORAIMA**

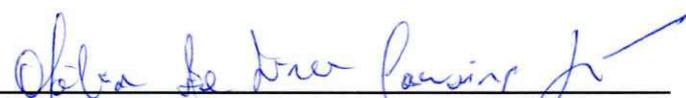
Dissertação apresentada como pré-requisito para conclusão do Curso de Mestrado em Ciências Ambientais (Recursos Naturais) da Universidade Federal de Roraima, defendida em 27 de novembro de 2020 e avaliada pela seguinte Banca Examinadora:



Profa. Dra. Lena Simone Barata Souza
Orientadora - Universidade Federal de Roraima



Prof. Dr. Carlos Sander
Membro - Universidade Federal de Roraima



Profa. Dra. Ofélia de Lira Carneiro Silva
Membro - Universidade Federal de Roraima



Prof. Dr. Roberto Câmara de Araújo
Membro - Universidade Federal de Roraima

*Dedico a Jeová Deus;
Às ciências ambientais;
Aos cidadãos roraimenses.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Jeová Deus, o Criador, que colocou os recursos naturais sob os nossos cuidados e habilidades para cumprir essa tarefa tão importante, e que me deu capacidade, força e persistência para ter chegado até aqui, bem como todas as ferramentas que me permitiram realizar esta dissertação.

À Universidade Federal de Roraima (UFRR), especificamente ao Programa de Pós-graduação em Recursos Naturais (Pronat), por tornar possível a realização deste trabalho, bem como também à CAPES/CNPq, pelo incentivo por meio da bolsa de estudos durante os dois anos de matrícula.

À Profa. Dra. Lena Simone Barata Souza pela acolhida como orientadora. Preciso destacar o quão bem me orientou, e abriu-me os olhos para as questões ambientais. É impressionante ver o quanto se importa com as questões ambientais e o quanto doa de si para contribuir. Grato pela disposição, esclarecimentos, disciplinas, incentivos e ouvido atento.

Ao Prof. Dr. Adriano Frutuoso da Silva pela coorientação, por me auxiliar a compreender conceitos relacionado a dispersão de poluentes em bacias hidrográficas, conceitos que agregaram muito à discussão dos resultados encontrados.

Ao grupo de pesquisa Caimbé-Geociências de Roraima, em especial a João Antônio, Ezequias, Karolina, Luis, Dennyson e Clínia, graduandos do curso de Geologia da UFRR, que me auxiliaram muito durante as coletas em campo, enfrentando chuva, sol, calor, mau-cheiro dos locais, as moscas, os urubus, a fome, os locais de hospedagem, os restaurantes, trabalhamos e rimos muito! Espero ainda poder retribuir ao menos uma parte do que fizeram pela Ciência.

Aos professores Dr. Carlos Sander, Dra. Ofélia de Lira Carneiro Silva e Dr. Pedro Alves da Silva Filho pelas contribuições realizadas na aula de qualificação, que refinaram os conceitos, as abordagens, métodos e os objetivos a serem alcançados. Ao Prof. Dr. Marcos José Salgado Vital pela orientação a como realizar os projetos para qualificação e projeto de dissertação. Estas orientações foram essenciais para encontrar marcos referenciais essenciais para a concepção deste trabalho.

Muito se disse até aqui sobre os que ajudaram diretamente, mas os que ajudaram indiretamente também foram tão essenciais quanto, por isso, agradeço imensamente por ter uma mãe que sempre me incentivou e orientou, Iderlene Pereira, que sempre me apoiou e tornou as condições favoráveis para que eu realizasse o mestrado. Aos meus irmãos, Amanda e Jhonnathan por me ajudarem no dia a dia para que eu não ficasse sobrecarregado com muitas coisas e me dedicasse ainda mais à pesquisa.

À Márcia Severino da Costa, que me auxiliou muito nas fases de seleção e iniciais do mestrado, por compartilhar suas experiências, contribuindo significativamente para que meus receios e ansiedades diminuíssem e que a realização das disciplinas e primeiras etapas da realização deste trabalho fossem consistentes.

À Larissa de Castro Ribeiro, que, ao promover um Curso de Geoprocessamento – Introdução ao ArcGIS, me proporcionou o ponto de partida para produzir todos os mapas que estão presentes nesta dissertação. Por meio desta iniciativa, foi possível conhecer as bases de dados em que as imagens poderiam ser baixadas gratuitamente.

Aos colegas de turma, em especial a Edimilla, Wilson, Karla Janine, Nayara, Alicinéia e Thaylanna, que sempre foram fonte de trocas de ideias nas salas de estudo antes da pandemia começar e que durante a pandemia ainda compartilharam muitas experiências e auxílios. Talvez estes não perceberam, mas o fato de estarem ali me incentivava ainda mais a prezar pela qualidade do trabalho em desenvolvimento. Enfim, a todos, mesmo sem ter mencionado acima, agradeço profundamente.

“Quanto aos céus, eles pertencem a Jeová,
Mas a Terra ele deu aos filhos dos homens.”
– Salmo 115:16

RESUMO

O crescimento populacional e a formação de novos centros urbanos de maneira acelerada e desordenada têm provocado reflexos na produção e na gestão de resíduos sólidos urbanos, visto que, sua disposição de forma não planejada pode afetar significativamente os recursos naturais disponíveis, como água, ar, solo e rocha. A presente pesquisa empregou métodos indiretos de investigação, isto é, não invasivos, como o sensoriamento remoto (morfometria) e a geofísica (Sondagem Elétrica Vertical) para avaliar as assinaturas em superfície e em subsuperfície, respectivamente, a fim de identificar possíveis contaminações advindas de áreas de disposição de resíduos sólidos, e o quanto isso impacta os corpos hídricos superficiais e subsuperficiais. As áreas focos de estudo perfazem a porção setentrional do estado de Roraima (municípios de Alto Alegre, Cantá e Normandia). A caracterização física de cada área utilizada como depósito de resíduos sólidos revelou que nenhuma delas segue as prescrições normativas, visto que, os três municípios possuem disposição de resíduos sólidos por meio de lixões a céu aberto. O município de Alto Alegre está assentado sobre terrenos cristalinos (gnaisse da Suíte Metamórfica Rio Urubu) recobertos por material arenoso e permeável, sendo a área utilizada para destinação final situada na borda da bacia de drenagem do Igarapé Comissão com vertentes predominantemente de absorção de umidade, características que propiciam rápida percolação do chorume em horizontes saturados e argilosos, fato este evidenciado pelo levantamento eletrorresistivo que detectou zonas condutivas sob a cava de disposição e a pilha de resíduos adjacente ($110,3 \Omega.m < \rho_a < 324,6 \Omega.m$, com migração em sentido vertical até 18 m de profundidade), podendo este fluir para SW em direção ao Igarapé. A área do município do Cantá engloba também rochas cristalinas (diabásio da Suíte Metamórfica Rio Urubu) recoberta por material areno-argiloso. Tais características favorecem o acúmulo do líquido contaminador em formato de pluma de contaminação, e que, quando se considera a topografia, nota-se a tendência de fluxo na direção sul, ao Rio Quitauá, corroborando com o levantamento eletrorresistivo, que detectou zonas condutivas até os 10 m de profundidade ($3,6 \Omega.m < \rho_a < 261,8 \Omega.m$) sob a cava de disposição de resíduos, que passa a percolar lateralmente em direção ao antigo lixão e o rio. A região do município de Normandia perfaz rochas sedimentares da Bacia do Tacutu (Formação Boa Vista-terrenos arenosos e inundáveis). Visto a área de alocação de resíduos estar situada sobre a bacia de drenagem do Igarapé Passarinho com baixa amplitude altimétrica (58 metros) proporciona alta vulnerabilidade a inundações e, conseqüentemente, a contaminação das águas superficiais e subterrâneas por processos de diluição. Foram detectadas zonas condutivas ($94,2 \Omega.m < \rho_a < 159,4 \Omega.m$) até os 2,4 m de profundidade, sendo estes valores indicativos de contaminação, que percola verticalmente e se espalha lateralmente em zonas saturadas e porosas próximas ao embasamento cristalino (55 m de profundidade). Diante do exposto acima, constata-se a eficiência dos métodos indiretos de investigação para estudos ambientais e a importância do cumprimento de legislações quanto à gestão de resíduos sólidos para a preservação ambiental.

Palavras-chave: Resíduo Sólido. Lixiviado. Morfometria. Sondagem Elétrica Vertical. Roraima

ABSTRACT

Population growth and the formation of new urban centers in an accelerated and disordered manner have caused reflexes in the production and management of urban solid waste, since its unplanned disposal can significantly affect the available natural resources, such as water, air, soil and rock. The present research employed indirect methods of investigation, that is, non-invasive, such as remote sensing (morphometry) and geophysics (Vertical Electrical Surveying) to evaluate the signatures on the surface and subsurface, respectively, to identify possible contamination arising from solid waste disposal areas, and how much it impacts surface and subsurface water bodies. The focus areas of study comprise the northern portion of the state of Roraima (municipalities of Alto Alegre, Cantá and Normandia). The physical characterization of each area used as a solid waste deposit revealed that none of them follows the normative prescriptions, since the three municipalities have solid waste disposal through open dumps. The municipality of Alto Alegre is based on crystalline terrain (gneiss from the Rio Urubu Metamorphic Suite) covered by a sandy and permeable material. Located at the edge of the Igarapé Commission drainage basin with predominantly moisture absorption strands, characteristics that provide rapid leachate percolation in saturated and clayey horizons, a fact evidenced by the electroresistant survey that detected conductive areas under the disposal pit and the pile of adjacent waste ($110.3 \Omega.m < \rho_a < 324.6 \Omega.m$, with vertical migration up to 18 m deep), which can flow towards SW in the direction of the stream. The Cantá municipality area also includes crystalline rocks (diabase from the Rio Urubu Metamorphic Suite) covered by sandy-clay material. Such characteristics favor the accumulation of the contaminating liquid in the form of a plume of contamination, and that, when considering the topography, there is a tendency of flow in the south direction, up until Quitauaú River, corroborating with the electro resistive survey, which detected conductive zones the 10 m depth ($3.6 \Omega.m < \rho_a < 261.8 \Omega.m$) under the waste disposal pit, which starts to percolate laterally towards the old dump and the river. The region of the municipality of Normandia owns sedimentary rocks of the Tacutu Basin (Boa Vista Formation - sandy and floodable terrains). Since the waste allocation area is located on the Passarinho stream drainage basin with low altimetric amplitude (58 meters), it provides high vulnerability to flooding and, consequently, the contamination of surface and groundwater by dilution processes. Conductive zones ($94.2 \Omega.m < \rho_a < 159.4 \Omega.m$) up to 2.4 m in depth were detected, these being indicative of contamination, which percolates vertically and spreads laterally in saturated and porous zones nearby to the crystalline basement (55 m deep). In view of the results obtained, there is evidence of the efficiency of indirect methods of investigation for environmental studies and the importance of complying with laws regarding the management of solid waste for environmental preservation.

Keywords: Solid Waste. Leachate. Morphometry. Vertical Electrical Sounding. Roraima.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos, conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004).	21
Figura 2 – Disposição de resíduos sólidos nos municípios de Roraima de acordo com o IBGE, na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.....	24
Figura 3 – Classificação sintética dos métodos geoeletricos, com destaque à técnica empregada no presente trabalho (em vermelho).	28
Figura 4 – Fluxo de corrente de um eletrodo A em superfície homogênea de resistividade elétrica ρ	29
Figura 5 – Disposição dos eletrodos na superfície do terreno e fluxo de corrente.....	31
Figura 6 – Exemplos de curvas de resistividade aparente de três e quatro camadas. Nas abscissas tem-se a metade da distância dos eletrodos A e B, que corresponde à profundidade relacionada respectivamente à resistividade aparente, que é representada pelas ordenadas.	34
Figura 7 – Principais padrões de drenagem.....	35
Figura 8 – Principais propriedades de drenagem.....	36
Figura 9 – Critérios de classificação dos corpos hídricos, considerando-se que os valores numéricos indicam a ordem do corpo hídrico, a coloração azul indica os canais, sendo que a azul clara indica o curso d'água principal, conforme a classificação de <i>Horton</i>	39
Figura 10 – Mapa de localização da área de estudo.	43
Figura 11 – Área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre.....	45
Figura 12 – Área de disposição de resíduos sólidos do município de Cantá.	46
Figura 13 – Área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia.....	47
Figura 14 – Distribuição da vegetação na área de estudo.....	48
Figura 15 – Mapa geológico do estado de Roraima.	51
Figura 16 – Unidades morfoesculturais do estado de Roraima.	53
Figura 17 – Principais rios do estado de Roraima.	54
Figura 18 – Hidrogeologia do estado de Roraima.....	56
Figura 19 – Fluxograma simplificado das etapas executadas.....	57
Figura 20 – Elementos do ER: (a) eletrodo de aço, (b) cabo elétrico com agarras do tipo “jacaré” (c) bobina de fio de 500 metros e (d) trena de 50 metros.....	59
Figura 21 – Materiais para o ER: baterias de 12V associadas em série, que alimentam o resistímetro GEOTESTE-300A (leitor de corrente e leitor de potencial).	60

Figura 22 – Exemplificação da coleta de dados geofísicos: (a) SEV com arranjo <i>Schlumberger</i> com desenho esquemático da pluma de contaminação e (b) coleta de dados em campo.....	61
Figura 23 – Método de registro e apresentação de dados do levantamento eletrorresistivo: (a) Ficha de campo da SEV e (b) Gráfico em escala bi-logarítmica.....	62
Figura 24 – Desenho esquemático da área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre/RR.....	65
Figura 25 – Área de disposição e empilhamento de resíduos sólidos no município de Alto Alegre/RR. (a) Pilha 1 posicionada próxima a Vicinal 11, o polígono amarelo representa parte do amontoado de resíduos da pilha coberto por vegetação. (b) Pilha 2 localizada na zona intermediária, com presença de carcaças de animais dispostas, principalmente, bovina. (c) Exemplificação de parte dos resíduos da pilha 3, com predominância de resíduos domésticos, este é posteriormente acomodado na cava.....	66
Figura 26 – Áreas de disposição e empilhamento de resíduos no município de Alto Alegre/RR. (a) Cava de disposição dos resíduos dispostos na pilha de resíduos 3 (polígono azul tracejado). (b) O polígono vermelho representa o acúmulo de água no fundo da cava. (c) Presença de urubus (setas amarelas) e animais mortos (círculo amarelo), atraindo diversos vetores de doenças...	67
Figura 27 – Padrões de drenagem do entorno da área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre/RR.....	69
Figura 28 – Delimitação da bacia no entorno do lixão, município de Alto Alegre/RR. As setas indicam o basculamento da bacia.	70
Figura 29 – Relevo sombreado da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR). Os valores numéricos indicam a ordem dos canais, de acordo com a classificação de <i>Horton</i>	71
Figura 30 – Mapa de declividade da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR).....	72
Figura 31 – Mapa hipsométrico da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR).....	72
Figura 32 – Orientação das vertentes da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR).....	73
Figura 33 – Levantamento eletrorresistivo no lixão do município do Alto Alegre/RR. (a) Localização das SEV. (b) Gráfico de profundidade x resistividade aparente.....	74
Figura 34 – Cava de disposição de resíduos sólidos no município de Alto Alegre/RR: (a) Afloramento posicionado ao fundo da cava de resíduos. (b) Vista aproximada ressaltando a presença de minerais de quartzo (círculos amarelos). (c) Vista aproximada ressaltando a presença de concreções lateríticas (círculos azuis).....	75
Figura 35 – Comparativo entre o perfil litológico (ver figura 34a) e a SEV 2 (ver figura 33a).	76

Figura 36 – Configuração da Sondagem Elétrica Vertical 2 (SEV 2) (Alto Alegre/RR). (a) Curva de resistividade aparente. (b) Interpretação das camadas, por meio do processo de inversão, com o <i>IPI2WIN</i>	77
Figura 37 – Curva de resistividade aparente da SEV 1 (Alto Alegre/RR).....	78
Figura 38 – Curva de resistividade aparente das SEV 3, 4 e 5 (Alto Alegre/RR).....	80
Figura 39 – Desenho esquemático da área de disposição de resíduos sólidos do município do Cantá/RR.	81
Figura 40 – Fotos da área de disposição de resíduos sólidos no município do Cantá/RR durante a estação chuvosa. (a) Vista a partir da rampa de acesso da cava de resíduos, com destaque ao acúmulo de chorume (polígono branco). (b) Entrada da cava de resíduos, com a presença de propriedades vizinhas no mesmo terreno (destaque em amarelo).....	82
Figura 41 – Fotos do antigo “lixão” do município do Cantá/RR. (a) Vista frontal da área. (b) Detalhe da pilha de resíduos remanescente (retângulo tracejado amarelo).....	83
Figura 42 – Área de disposição de resíduos sólidos no município de Cantá/RR na estação seca. (a) e (b) Presença de fumaça que sugere a prática de incineração dos resíduos (destacados nos círculos brancos).....	84
Figura 43 – Padrões de drenagem do entorno da área de disposição de resíduos sólidos do município do Cantá/RR.	85
Figura 44 – Delimitação da bacia no entorno do lixão, município do Cantá, RR. Os valores numéricos indicam a ordem dos canais, de acordo com a classificação de Horton.	86
Figura 45 – Relevo sombreado da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR). As setas indicam o sentido do basculamento da bacia (para esquerda).....	87
Figura 46 – Mapa de declividade da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR).	88
Figura 47 – Mapa hipsométrico da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR).....	89
Figura 48 – Orientação das vertentes da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR).	89
Figura 49 – Levantamento eletrorresistivo na área de disposição de resíduos sólidos no município do Cantá/RR. (a) Localização das SEV. (b) Gráfico de profundidade x resistividade aparente.....	90
Figura 50 – Configuração da Sondagem Elétrica Vertical 3 (SEV 3) (Cantá/RR). (a) Curva de resistividade aparente. (b) Interpretação das camadas, por meio do processo de inversão, com o <i>IPI2WIN</i>	91
Figura 51 – Curva de resistividade aparente da SEV 1 (Cantá/RR).....	92
Figura 52 – Curva de resistividade aparente das SEV 2, 4 e 5 (Cantá/RR).	94

Figura 53 – Desenho esquemático da área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia, RR.....	95
Figura 54 – Área de disposição de resíduos sólidos de município de Normandia/RR. (a) Vista frontal da entrada do aterro sanitário desativado (à esquerda) e a pilha de resíduos sólidos 1 (à direita). (b) e (c) Resíduos encontrados na pilha de resíduos 1 na estação chuvosa. (d) Área inundada dentro da disposição de resíduos. (e) Planície de inundação do igarapé Pau Grande na área externa.....	96
Figura 55 – Áreas de disposição de resíduos sólidos de Normandia/RR no período seco. (a) Incineração de resíduos. (b) Resíduos sólidos incinerados. (c) Vista panorâmica da pilha de resíduos 1 (ver Figura 53). (d) Pilha de resíduos 2 (ver Figura 53), durante a realização de uma das sondagens elétricas, ao fundo, resíduos incinerados.....	97
Figura 56 – Aterro sanitário desativado do município de Normandia/RR. (a) Célula do aterro sanitário, durante a realização de uma das sondagens elétricas (no círculo vermelho, nota-se que a geomembrana já apresenta manifestações patológicas). (b) Acúmulo de água na base da célula (retângulo amarelo), na lateral direita, encontra-se a edificação que funcionaria como cooperativa.....	98
Figura 57 – Padrões de drenagem do entorno da área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia/RR.....	100
Figura 58 – Delimitação da bacia no entorno do lixão, município de Normandia/RR. As setas indicam o basculamento para direita da bacia.....	100
Figura 59 – Relevo sombreado da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR). Os valores numéricos indicam a ordem dos canais, conforme a classificação de Horton.....	101
Figura 60 – Mapa de declividade da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR).....	102
Figura 61 – Mapa hipsométrico da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR).....	103
Figura 62 – Orientação das vertentes da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR).....	103
Figura 63 – Levantamento eletrorresistivo na área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia/RR. (a) Posicionamento das SEV. (b) Gráfico de profundidade x resistividade aparente.....	104
Figura 64 – Configuração da Sondagem Elétrica Vertical 2 (SEV 2) (Normandia/RR). (a) Curva de resistividade aparente, (b) Interpretação das camadas, por meio do processo de inversão, com o <i>IPI2WIN</i> . (c) Foto da coleta da SEV 2 em via próxima a área de despejo de resíduos.....	105
Figura 65 – Curva de resistividade aparente da SEV 1 (Normandia/RR).....	107
Figura 66 – Curva de resistividade aparente da SEV 3 (Normandia/RR).....	108
Figura 67 – Curvas de resistividade elétrica do Normandia/RR. (a) SEV 4 e 5.....	110

Figura 68 – Modelo hipotético da contaminação em forma de isópacas para a área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre/RR. A representação em planta indica a localização das SEV e a isópaca no primeiro nível de investigação (1,0 m).	112
Figura 69 – Modelo hipotético da contaminação em forma de isópacas para a área de disposição de resíduos sólidos do município de Cantá/RR. A representação em planta indica a localização das SEV e a isópaca no primeiro nível de investigação (1,0 m).	114
Figura 70 – Modelo hipotético da contaminação em forma de isópacas para a área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia/RR. A representação em planta indica a localização das SEV e a isópaca no primeiro nível de investigação (1,0 m).	116

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Superfície semiesférica de corrente elétrica	28
Equação 2 – Densidade de corrente elétrica.....	28
Equação 3 – Relação de densidade de corrente elétrica e campo elétrico.....	29
Equação 4 – Relação entre resistividade e condutividade elétrica	30
Equação 5 – Campo elétrico em função da resistividade elétrica	30
Equação 6 – Diferença de potencial entre dois pontos por integração	30
Equação 7 – Diferença de potencial entre dois eletrodos infinitamente distantes.....	30
Equação 8 – Equação fundamental do método da Eletrorresistividade.....	30
Equação 9 – Potencial medido sobre o eletrodo M	31
Equação 10 – Potencial medido sobre o eletrodo N.....	31
Equação 11 – Diferença de potencial entre os eletrodos M e N.....	32
Equação 12 – Equação do método da Eletrorresistividade para quatro eletrodos.....	32
Equação 13 – Fator geométrico k.....	32
Equação 14 – Resistividade elétrica num meio homogêneo	32
Equação 15 – Quantidade mínima de SEV em função da área e profundidade	34
Equação 16 – Coeficiente de compacidade (Kc).....	37
Equação 17 – Índice de circularidade (Ic).....	38
Equação 18 – Fator de forma (Kf).....	38
Equação 19 – Índice de sinuosidade (Is)	40
Equação 20 – Densidade de drenagem (Dd)	40
Equação 21 – Fator de Assimetria (FA)	40

LISTA DE APÊNDICE

Apêndice A – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 1 (Alto Alegre).....	130
Apêndice B – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 2 (Alto Alegre).....	130
Apêndice C – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 3 (Alto Alegre).....	131
Apêndice D – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 4 (Alto Alegre).....	131
Apêndice E – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 5 (Alto Alegre)	132
Apêndice F – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 1 (Cantá).....	132
Apêndice G – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 2 (Cantá)	133
Apêndice H – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 3 (Cantá)	133
Apêndice I – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 4 (Cantá).....	134
Apêndice J – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 5 (Cantá).....	134
Apêndice K – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 1 (Normandia).....	135
Apêndice L – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 2 (Normandia)	135
Apêndice M – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 3 (Normandia)	136
Apêndice N – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 4 (Normandia).....	136
Apêndice O – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 5 (Normandia).....	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
ER	Levantamento Eletorresistivo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
Pronat	Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais
RR	Roraima
SABV	Sistema Aquífero Boa Vista
SEPLAN	Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento de Roraima
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
UFRR	Universidade Federal de Roraima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	21
1.2	IMPACTOS DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	25
1.3	INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO SUBSUPERFICIAL	26
1.4	ASPECTOS DA REDE DE DRENAGEM	35
2	OBJETIVOS	42
2.1	OBJETIVO GERAL	42
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
3.1.1	Generalidades e vias de acesso	44
3.1.2	Aspectos fisiográficos.....	47
3.1.3	Contexto Geológico	49
3.1.4	Contexto Geomorfológico	52
3.1.5	Contexto hidrográfico e hidrogeológico simplificado	53
3.2	PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS	57
3.2.1	Sensoriamento Remoto (SR)	58
3.2.2	Levantamento Eletrorresistivo (ER)	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE ALTO ALEGRE ..	64
4.1.1	Caracterização morfométrica.....	68
4.1.2	Assinatura geofísica.....	74
4.2	DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE CANTÁ	81
4.2.1	Caracterização morfométrica.....	84
4.2.2	Assinatura geofísica.....	90

4.3	DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE NORMANDIA.....	95
4.3.1	Caracterização morfométrica.....	98
4.3.2	Assinatura geofísica.....	104
4.4	MODELAGEM GEOFÍSICA	111
4.4.1	Alto Alegre	111
4.4.2	Cantá.....	113
4.4.3	Normandia	115
	CONCLUSÕES	117
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE	130

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial traz consigo o crescimento da produção de resíduos, quer sólidos, líquidos ou gasosos. E a demanda para disposição de resíduos sólidos tem crescido numa proporção cada vez maior associados a intensificação da atividade industrial e avanços tecnológicos que se difundem no contexto da globalização (COKER et al., 2016; FRANCESCHI et al., 2017; ZAINI; ISHAK; ZOLKEPLI, 2019).

Nesse contexto, o surgimento de novos centros urbanos, êxodo rural, e crescimento das cidades brasileiras de maneira acelerada e desordenada, aliado às alterações nos padrões de consumo e produção, propiciando alterações no ambiente natural. Dessa maneira, se não houver a correta gestão dos resíduos produzidos, desencadeia-se problemas ambientais, que podem afetar direta e indiretamente a própria população, isto é, por meio da contaminação do solo, da água e do ar (AMARAL; LANA, 2017; BOSCOV, 2012).

Neste sentido, a disposição de resíduos sólidos ressalta os efeitos da relação do homem com o ambiente natural. Assim, a disposição final é tema de preocupação e difícil solução para a sociedade, visto que seus impactos são sentidos a médio e longo prazo, tanto na alteração do ambiente, quanto na saúde pública (MANZANO et al., 2019; PORCIÚNCULA; LEAL, 2019; SOUZA, 2019).

Embora já existam técnicas para a correta disposição final de resíduos sólidos, aplicando princípios de Engenharia, com a devida impermeabilização do solo e cobertura, como os aterros sanitários, os depósitos de resíduos sólidos no estado de Roraima indicam estar fora dos padrões estabelecidos por lei (BRASIL, 2019; IBGE, 2010; SOUZA; ANDRADE, 2018). Estas áreas tornam-se potenciais veículos de propagação de doenças ao ser humano, bem como da fauna e flora que usufrui da rede de drenagem à jusante (MANZANO et al., 2019; SCHIAVINATO; GONZALEZ, 2019).

Ressaltando que, quando o ambiente natural é exposto à contaminação e sua recuperação requer a aplicação de atividades onerosas, nota-se a importância de estudos que possam identificar possíveis contaminações, principalmente por meio de métodos que não sejam invasivos (que não requerem perfurações do meio, ou deslocamento de volume de solo), como os propostos por Bortolin e Malagutti Filho (2010, 2012), Souza e Andrade (2018), Pires e Oliva (2020).

A possibilidade de aquisição de dados em grande escala a um custo relativamente baixo por meio de ferramentas indiretas como a geofísica e o sensoriamento remoto viabiliza sua aplicação em estudos ambientais, aliados a métodos elétricos, que têm se mostrado bastante

eficientes em diversas pesquisas realizadas nos últimos anos em aterros sanitários, aterros controlados, lixões e cemitérios (CANATA et al., 2018; SOUZA; CARVALHO, 2017; TAMUNO; INICHINBIA, 2019; XAVIER et al., 2018).

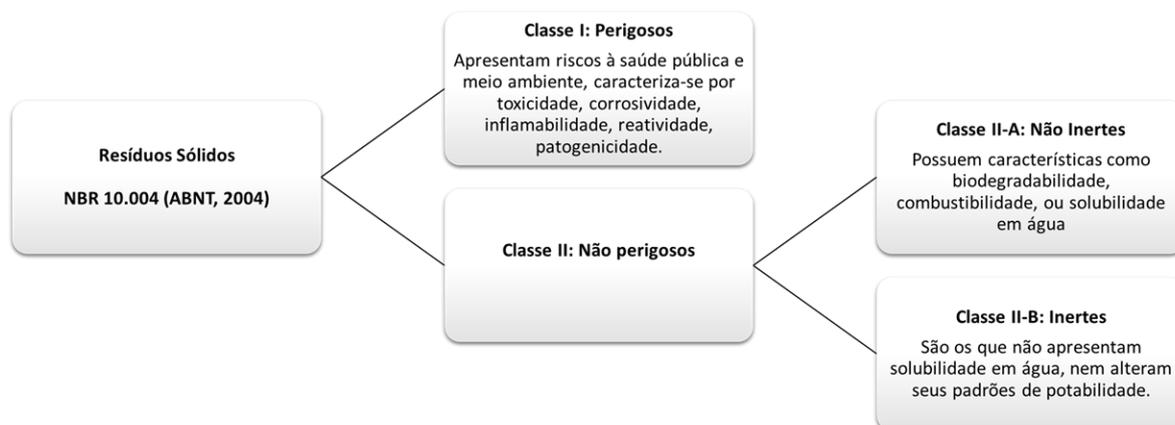
Em vista disso, este trabalho apresenta o emprego das ferramentas supracitadas em lixões do estado de Roraima, sendo as áreas mapeadas pertencentes à parte da porção setentrional (municípios de Cantá, Alto Alegre e Normandia), para que haja um diagnóstico dos efeitos provocados pela disposição de resíduos sólidos a céu aberto, no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Branco, principal corpo hídrico de Roraima.

A obtenção de dados de contaminação contribui no contexto científico e social, com a possibilidade de nortear medidas de mitigação dos impactos conforme as normas regulamentadoras atualmente disponíveis, como a NBR 8.419 (ABNT, 1992) e a NBR 15.849 (ABNT, 2010), visto que em curto prazo o problema não é observável por ocorrer em subsuperfície, mas a médio e longo prazo, pode-se desencadear problemas ambientais, sociais e de saúde pública (CANATA et al., 2018).

1.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2004) define resíduos sólidos como aqueles materiais que se encontram nos estados sólidos ou semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Há duas principais classificações para os resíduos sólidos na NBR 10.004 (ABNT, 2004): Classe I (perigosos) e Classe II (não perigosos), conforme a figura 1.

Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos, conforme a NBR 10.004 (ABNT, 2004).



Fonte: Adaptado da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

No contexto nacional, dados revelam que, em 2018, foram produzidas mais de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos e, desse total, 92% foram coletados; isto indica que mais de 6 milhões de toneladas de resíduos não foram alocados em depósitos para tal finalidade. Além disso, cerca de 29 milhões de toneladas de resíduos não foram destinados de forma adequada, ou seja, por meio de lixões ou aterros controlados (BRASIL, 2019).

No que diz respeito à destinação apropriada, ou inapropriada, de resíduos sólidos, normalmente há três formas mais comuns de disposição final (isto é, o que não será reciclado, remanufaturado ou reutilizado): lixão (disposição de resíduos a céu aberto); aterro controlado (há a coleta do chorume, mas sem tratamento) e aterro sanitário, com impermeabilização de solo e tratamento de chorume, considerado a melhor opção de disposição (GOES, 2016).

A ABNT (1992) define o aterro sanitário como uma obra de Engenharia que emprega técnicas de disposição dos resíduos sólidos urbanos que mitigam os impactos ambientais e efeitos sobre a saúde pública. O empreendimento contempla sistema de drenagem superficial e tratamento do material lixiviado, drenagem de águas pluviais, impermeabilização do solo (material argiloso e/ou geomembranas), sistema de drenagem de gases produzidos pelos resíduos e cobertura com uma camada de solo ao final de cada jornada de trabalho.

O aterro sanitário pode ter sua concepção adaptada à demanda do município que, caso seja classificado como de pequeno porte, isto é, com produção de resíduos inferior a 20 toneladas por dia, o mesmo pode ser construído em forma de valas, ou trincheiras, conforme prescrito pela NBR 15.849 (ABNT, 2010), possibilitando assim a realização de projetos mais simplificados, diminuindo consideravelmente o custo da obra.

Os requisitos mínimos para o projeto de aterro sanitário são mencionados pelas normas NBR 13895 (ABNT, 1997a), que requerem a construção de poços de monitoramento e amostragem da água na área (para a verificação dos parâmetros de potabilidade) e a NBR 13896 (ABNT, 1997b), que estabelece considerações técnicas para sua construção, conforme a seguir:

- a) Recursos hídricos: distância mínima de 200 metros;
- b) Núcleos populacionais: distância mínima de 500 metros;
- c) Existência de vias de acesso para construção e utilização;
- d) Vida útil mínima: 10 anos;
- e) Geologia e tipo de solo: nível freático superior a 3 metros e coeficiente de permeabilidade do solo inferior a 10^{-6} cm/s;
- f) Topografia: declividade superior a 1% e inferior a 30%;
- g) Verificação de estabilidade de taludes para aterros de médio e grande porte;
- h) Verificação da legislação para o licenciamento ambiental da área a ser construída.

Conforme dados do IBGE (2010), que apresenta os métodos de disposição de resíduos sólidos urbanos dos municípios brasileiros, a maior parte dos municípios empregam a forma de disposição em vazadouros a céu aberto (lixões), especialmente em municípios de pequeno porte (população inferior a 50 mil habitantes), já nas regiões sul e sudeste, há maior concentração de aterros controlados e sanitários, principalmente nas capitais e municípios de médio e grande porte.

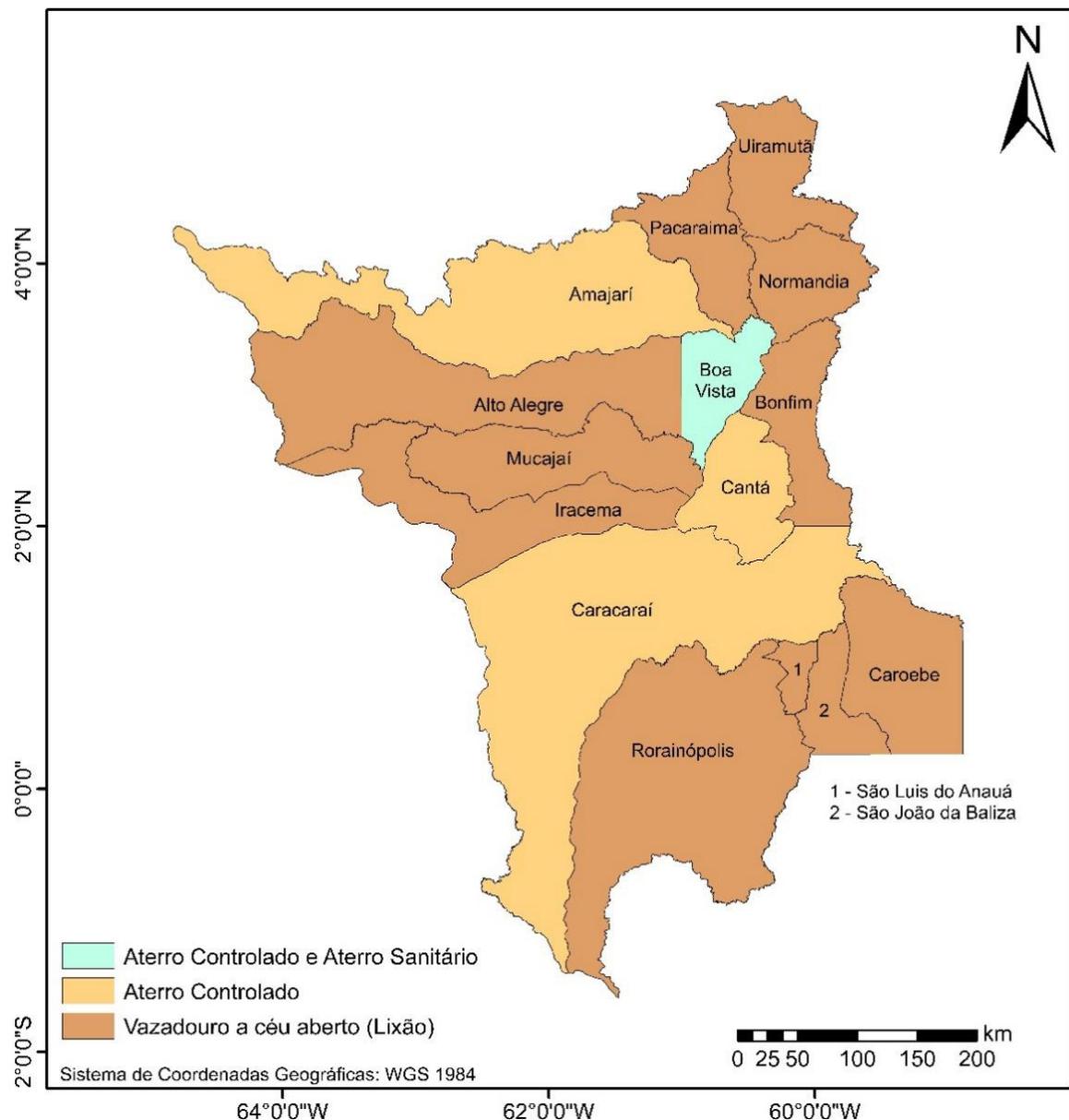
Além disso, na região norte do Brasil houve um aumento sutil da participação percentual de disposição de resíduos nos aterros sanitários e crescimento nos aterros controlados e, comparado às outras regiões, a região Norte é a que tem o menor percentual de resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários (35,3%), conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2018 a 2019, realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (BRASIL, 2019).

No estado de Roraima (extremo norte do Brasil), o método de disposição predominante é o de vazadouros a céu aberto (lixões), conforme a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, de 2008 (IBGE, 2010). O município de Boa Vista, capital do estado de Roraima, apresenta disposição por aterro sanitário e por aterro controlado. Os municípios de Amajari, Cantá e Caracará contam com aterros controlados, e os demais contam apenas com a disposição por lixões a céu aberto (Figura 2).

Em contraste com as informações apresentadas pelo IBGE (2010), Souza, Andrade e Moraes (2018) realizaram um estudo no município de Caracará (sul do estado de Roraima) e constataram que a disposição de resíduos é, na verdade, por lixão, isto é, a área não se enquadra nas especificações de um aterro controlado, em que se requer a cobertura do material a cada dia de trabalho, e, inclusive, constatou-se presença de catadores, além da incineração de resíduos e disposição de resíduos hospitalares junto a resíduos de classificações distintas, como os não perigosos.

Com relação ao município de Boa Vista, Scacabarossi e Périco (2014); Souza e Andrade (2018) e Assis Brasil, Pires e Hayd (2019) verificaram que sua disposição também ocorre por lixão a céu aberto, visto que não há sistema de proteção, drenagem e tratamento do percolato, nem cobertura diária do material depositado, conforme prescrito pela ABNT (1992), além da presença de catadores vivendo em condições insalubres. Outros trabalhos, como o de Rikils et al. (2016), sustentam que nenhum dos 15 municípios roraimenses conta com disposição adequada de resíduos sólidos.

Figura 2 – Disposição de resíduos sólidos nos municípios de Roraima de acordo com o IBGE, na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.



Fonte: Adaptado de IBGE (2010).

Estudos realizados em diversos municípios do estado de Roraima, como os de Rikils et al. (2016) – em São João da Baliza, Caroebe e São Luís do Anauá; Scacabarossi e Périco (2014) – em Boa Vista; Gomes e Silva Filho (2020) – nos 15 municípios, estimam, a partir de ensaios de composição gravimétrica, que cerca de 60% dos resíduos são orgânicos, seguidos de cerca de 15% composto por papelão, sem considerar materiais com alto potencial para reuso e reciclagem, como garrafas PET, alumínio e resíduos advindos de podas (galhadas), com isso, salienta-se que o processo de coleta seletiva reduziria drasticamente a demanda de resíduos sólidos para disposição final.

Diante do panorama nacional, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), que foi implementada em 2010, tinha como alvo erradicar os lixões dos municípios até agosto de 2014 por intermédio da Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), estabelecendo prazos para a implantação de aterros de acordo com o porte do município, sendo prazos mais curtos para grandes municípios e prazos maiores para pequenos municípios (até 50 mil habitantes).

No entanto, como a readequação não foi realizada por grande parcela das cidades brasileiras, especialmente as de menor porte, foi necessário elaborar novos prazos por meio do projeto de Lei nº 2.289/2015 (BRASIL, 2015a), e posteriormente pela Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020 (BRASIL, 2020), para que os prazos de cumprimento do PNRS fossem estendidos para 02 de agosto de 2024 para municípios de até 50 mil habitantes conforme Censo de 2010, categoria que se enquadra nos municípios que foram estudados neste trabalho.

1.2 IMPACTOS DA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O crescimento da população é diretamente proporcional ao consumo, o que resulta também no aumento dos resíduos que são produzidos, principalmente nas cidades (COKER et al., 2016; FRANCESCHI et al., 2017). Assim, é observado que a disposição final inadequada destes pode desencadear problemas de ordem sanitária, econômica e estética (BRASIL, 2015b).

Como já mencionado, o lançamento dos resíduos nos lixões é ainda muito comum no Brasil (BRASIL, 2019; IBGE, 2010), e consiste basicamente em depositar esse material produzido em um local a céu aberto, sem nenhuma proteção ou prevenção contra doenças. Esse tipo de disposição torna-se atrativo para diversos fatores patogênicos, animais e, também, causa danos ao meio geológico subsuperficial (e. g., águas subterrâneas) devido ao não tratamento do chorume (ou lixiviado), que é um líquido contaminante de cor escura, odor nauseante e de elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), originado de processos biológicos, químicos e físicos da decomposição de matéria orgânica (GOES, 2016; YOUCAI, 2019).

Os períodos chuvosos agravam a situação, facilitando o processo de lixiviação do chorume por rochas porosas (os poros possibilitam maior fluxo de água pelo meio) em direção aos aquíferos, em forma de pluma de contaminação, em que há a percolação desse líquido pelas camadas subsuperficiais e disperso quando migra para o nível freático (BRASIL, 2015b; CANATA et al., 2018; MOREIRA; BRAGA, 2009).

Além da presença de matéria orgânica e água, o chorume também pode conter em sua composição íons metálicos, especialmente quando se trata de resíduos sólidos urbanos ou

industriais, conforme Santos Filho et al. (2017). Os metais mais encontrados em ensaios de caracterização de águas contaminadas são o cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), alumínio (Al) e chumbo (Pb), na forma iônica (SOUZA, 2019).

O aumento na concentração de íons é endossado, principalmente, pelo fato de muitos resíduos eletrônicos serem descartados juntamente com matéria orgânica, visto que, ao mesmo tempo em que a matéria orgânica passa pelo processo de decomposição, o material lixiviado favorece a emissão dos íons metálicos ao chorume produzido. Um estudo realizado por Damasceno et al. (2014), que consistiu em ensaiar matéria orgânica em compostagem com e sem resíduos eletrônicos, constataram que quando os resíduos são dispostos sem separação, acelera-se o processo de liberação de íons de cobre (Cu), chumbo (Pb) e níquel (Ni), e, de forma menos pronunciada de zinco (Zn) no lixiviado.

1.3 INVESTIGAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO SUBSUPERFICIAL

Nos últimos anos, diversos trabalhos trazem investigações de plumas de contaminação, quer sejam em aterros sanitários (BICHET; GRISEY; ALEYA, 2016; MEPAIYEDA et al., 2019; PORCIÚNCULA; LEAL, 2019; ZAINI; ISHAK; ZOLKEPLI, 2019), quer em aterros controlados em modelo de evolução temporal da pluma de contaminação (BORTOLIN; MALAGUTTI FILHO, 2010, 2012), quer em lixões (PIRES; OLIVA, 2020; SOUZA; ANDRADE, 2018; SOUZA; ANDRADE; MORAIS, 2018). Há ainda outros que trazem estudo de contaminação por necrochorume (tipo de chorume produzido pela decomposição de cadáveres) em cemitérios (DONATO, 2019; GONÇALVES; OLIVA, 2019; XAVIER et al., 2018). Estes apresentam uma abordagem geofísica de investigação de indícios de contaminação subsuperficial.

Os trabalhos supracitados utilizaram os princípios da ciência Geofísica, tomando como base as propriedades da resistividade e/ou condutividade conforme Orellana (1972), que define a resistividade elétrica como a propriedade que caracteriza a dificuldade que um material tem em conduzir corrente elétrica. O chorume quando em contato com materiais geológicos, causa a diminuição da resistividade elétrica natural do material em até 10 vezes, devido à grande concentração de íons metálicos dissolvidos, assim, a baixa resistividade pode ser associada à índices de contaminação (BORTOLIN; MALAGUTTI FILHO, 2012; DUDA et al., 2020; SOUZA; ANDRADE, 2018).

A resistividade de solos e rochas é afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água e quantidade e natureza dos sais dissolvidos. Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água e a salinidade. O aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos leva a uma diminuição dos valores de resistividade. Outras propriedades também importantes, mas de menor relevância, são a permeabilidade magnética (fator de influência indireta) e a constante dielétrica das rochas e dos minerais (KEAREY; BROOKS; HILL, 2009; TELFORD et al. 1990).

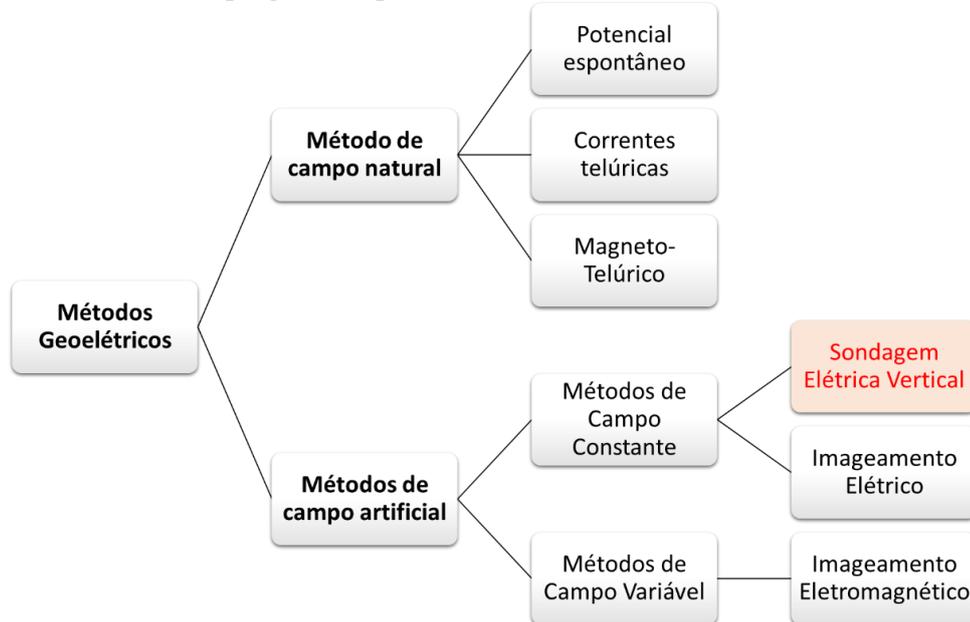
Uma das principais vantagens da aplicação dos métodos geofísicos em relação aos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície (por exemplo, as sondagens e os poços de monitoramento) é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo consideravelmente menor. Esses métodos têm caráter pouco oneroso, são eficientes na avaliação e caracterização de problemas ambientais, além de serem de natureza não invasiva, isto é, não alteram o meio físico (BORTOLIN; MALAGUTTI FILHO, 2012; BRAGA, 2016).

A aplicação de métodos geofísicos não é recente. Desde 1720 que se publica trabalhos que abordam a resistividade das rochas. A descoberta de que o solo poderia ser um condutor elétrico foi em 1746. Várias formas de gerar campo elétrico artificial para detecção de rochas e minerais foram desenvolvidas até 1915, em que se desenvolveram arranjos de disposição com medição de corrente e potencial, e. g., *Schlumberger* e *Wenner*. Vale salientar que, apesar desses avanços, durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) as pesquisas tiveram pouco progresso. O emprego dessas técnicas se limitava a fins de mineração.

Após a Primeira Guerra Mundial e até os anos de 1960 desenvolveram-se outros métodos como o Eletromagnético e o Magneto-Telúrico, e novas aplicações, como na indústria petrolífera e foi nesse período que foram reportados os primeiros registros, ainda que raros, da utilização dos métodos geofísicos para detecção de contaminação, mas somente a partir da década de 1970 que o método se difundiu e se mostrou eficaz na realização de estudos ambientais (BORTOLIN, 2009).

Como observado, os métodos geofísicos desenvolvidos ao longo do tempo são diversos, e a escolha depende da finalidade, visto que cada método tem suas vantagens e desvantagens. Quando se considera os métodos geoeletricos, que já se mencionou sua vasta aplicação em estudos que envolvem detecção e delimitação de plumas de contaminação, Orellana (1972) os classifica conforme a figura 3.

Figura 3 – Classificação sintética dos métodos geoeletricos, com destaque à técnica empregada no presente trabalho (em vermelho).



Fonte: Adaptado de Orellana (1972).

Para empregar a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) no Ensaio Eletroresistivo (comumente denotado por ER) que mede a resistividade aparente do meio geológico, é necessário criar um campo elétrico artificial, relacionando a corrente elétrica e o potencial elétrico. Para a compreensão, a figura 4 apresenta um eletrodo metálico A (empregado para a medição de corrente elétrica no terreno) infinitamente distante do eletrodo B, de modo a possibilitar as observações consideradas a seguir.

As linhas de corrente são radiais e formam uma superfície semiesférica de área, visto que acima do nível do terreno supõe-se apenas a existência de ar (em que a condutividade elétrica é nula), e dessa maneira, determina-se a área de atuação do fluxo de corrente e a densidade de corrente, respectivamente, nas equações (1) e (2).

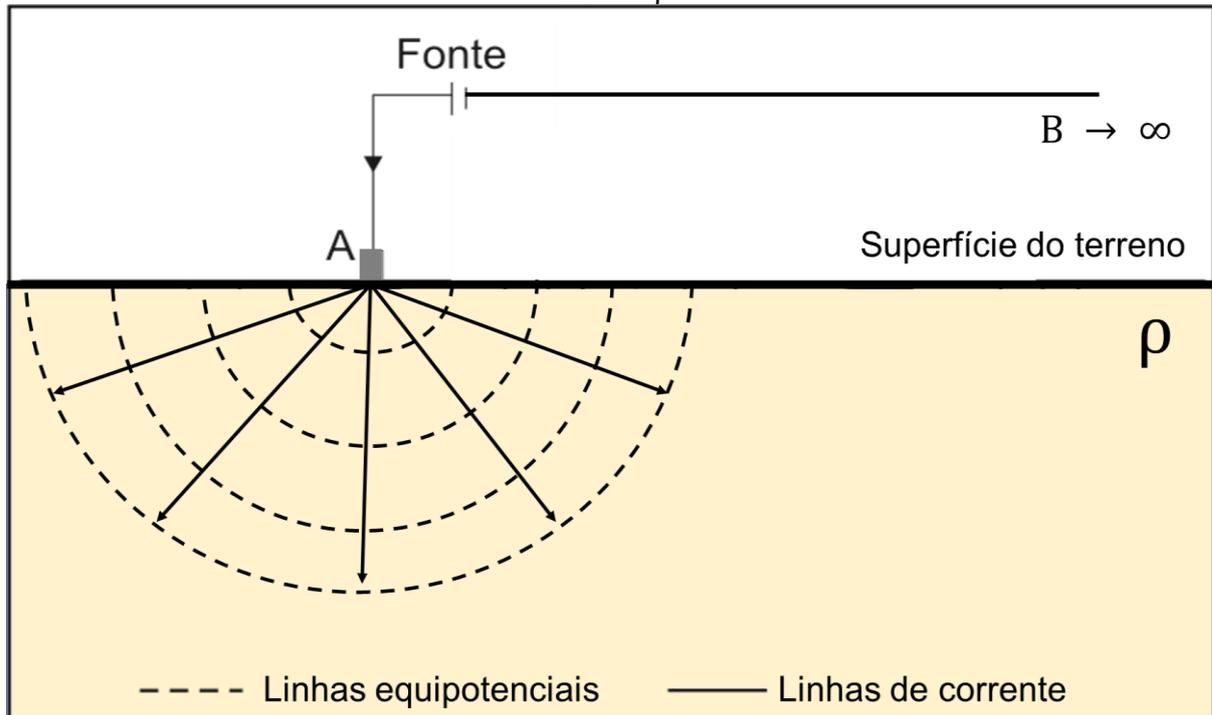
$$A = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (1)$$

$$J = \frac{i}{A} = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2)$$

Em que:

- A – Área da superfície semiesférica (em m²);
- r – Raio correspondente ao percurso de corrente elétrica (em m);
- J – Densidade de corrente (em A/m²);
- i – Corrente elétrica (em A).

Figura 4 – Fluxo de corrente de um eletrodo A em superfície homogênea de resistividade elétrica ρ .



Fonte: Baseado em Bortolin e Malagutti Filho (2010).

Vetorialmente, a densidade de corrente é diretamente proporcional ao campo elétrico e à condutividade elétrica. A equação para o cálculo da resistividade é dada seguindo a Lei de *Ohm*, que é expressa na equação (3), que considera o fluxo de uma corrente contínua ou alternada de baixa frequência, em um meio homogêneo, ilimitado e isotrópico. Sendo assim, tem-se:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (3)$$

Em que:

- \vec{J} – Densidade de corrente (em A/m²);
- σ – Condutividade elétrica (em S/m);
- \vec{E} – Campo elétrico (em V/m).

Partindo desta lei, têm-se as seguintes relações na forma escalar: a resistividade é o inverso da condutividade, conforme a equação (4); e substituindo as equações (2) e (4) na equação (3), tem-se a equação (5).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

$$E = \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (5)$$

Em que:

- ρ – Resistividade elétrica (em $\Omega \cdot m$).

O campo elétrico, então é inversamente proporcional ao quadrado da distância r . De acordo com Reitz, Milford e Chisty (1982), a diferença de potencial entre dois pontos r_1 e r_2 quaisquer é dada na equação (6), a seguir.

$$\Delta V = - \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (6)$$

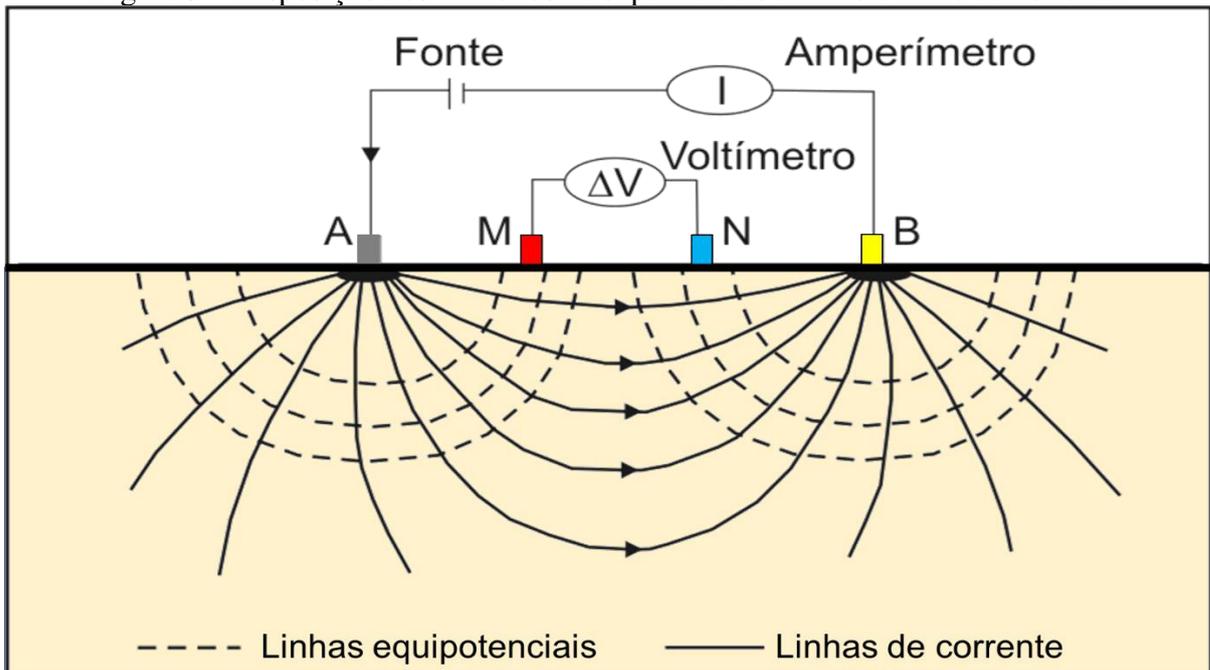
Assim, a diferença de potencial do eletrodo A ao B (Figura 5) será dada pela equação (7), substituindo-se a equação (5) no termo correspondente ao campo elétrico (E). Isolando-se o termo ρ , tem-se a resistividade elétrica do terreno em termos da distância dos eletrodos, diferença de potencial e corrente elétrica aplicada na equação (8), sendo esta última a equação fundamental do Método da Eletrorresistividade no meio geológico homogêneo e isotrópico.

$$\Delta V = - \int_r^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{r} = - \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \int_r^{\infty} \frac{1}{r^2} \cdot dr = \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (7)$$

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{\Delta V}{i} \quad (8)$$

Quando se considera uma distância finita entre os eletrodos (figura 5), a diferença de potencial entre dois pontos será afetada por ambos os eletrodos de corrente. Injeta-se corrente contínua ou alternada de baixa frequência em dois pontos (eletrodos A e B) para medir a diferença de potencial entre dois outros pontos (eletrodos M e N), que apresenta a disposição dos pontos, denominada Arranjo *Schlumberger* (BRAGA, 2016; ORELLANA, 1972). Quando se considera esse arranjo, o potencial medido sobre o eletrodo M será a soma das contribuições de cada eletrodo de corrente, como na equação (9). De forma análoga, o potencial sobre o eletrodo N será dado na equação (10).

Figura 5 – Disposição dos eletrodos na superfície do terreno e fluxo de corrente.



Fonte: Baseado em Souza (2010) e Bortolin e Malagutti Filho (2010).

$$V_M = \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r_1} + \left(-\frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r_2} \right) = \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (9)$$

$$V_N = \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r_3} + \left(-\frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r_4} \right) = \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left[\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right] \quad (10)$$

Em que:

- r_1 – Distância entre os eletrodos A e M;
- r_2 – Distância entre os eletrodos B e M;
- r_3 – Distância entre os eletrodos A e N;
- r_4 – Distância entre os eletrodos B e N.

Dessa forma, a diferença de potencial entre os eletrodos M e N é dada pela equação (11), e, isolando-se o termo ρ , tem-se a equação (12), denominada expressão fundamental do Método da Eletroresistividade para um meio geológico homogêneo e isotrópico, para dispositivo linear com quatro eletrodos. Visto que se obedece a Lei de *Ohm*, independentemente da distância entre os eletrodos, ΔV e I ajustam-se de modo a resultar sempre no mesmo valor de ρ .

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{i \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] \quad (11)$$

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta V}{i} \cdot \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \quad (12)$$

Pode-se, também, isolar o termo denominado fator geométrico (parcela que depende da distância dos eletrodos na superfície do terreno), denominado por κ , que é apresentado na equação (13), mostrada por Silva et al. (2018), dada por:

$$\kappa = 2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \quad (13)$$

Substituindo o termo κ da equação (13) na equação (12), obtém-se a resistividade elétrica de um meio homogêneo, conforme equação (14).

$$\rho = \kappa \cdot \frac{\Delta V}{i} \quad (14)$$

No entanto, a equação (14) é válida somente para meios homogêneos, o que não acontece com o subsolo, pois este é constituído por diversas camadas de diferentes resistividades e espessuras (ORELLANA, 1972). Sendo assim, a resistividade medida é chamada de resistividade aparente (ρ_a), que não é propriamente a resistividade média, e sim um parâmetro experimental que expressa os resultados das medições e dependem do espaçamento entre os eletrodos, espessuras e resistividades verdadeiras do pacote rochoso da área em estudo.

Portanto, a ρ_a , é numericamente obtida utilizando-se a equação (14), sendo posteriormente estimada utilizando processos de inversão, que é um método computacional, que se baseia em compor uma curva de resistividade teórica, para que se compreenda como se configuram as camadas em subsuperfície, isto é, distinção de camadas arenosas, siltosas, argilosas, nível da água e embasamento rochoso, por meio deste, pode-se ter como parâmetros: a resistividade teórica e espessura da camada associada à referida resistividade teórica (BOKHONOK et al. 2017; BRAGA, 2016; RANGEL et al., 2018; SILVA et al., 2018).

Em outras palavras, por meio do processo de inversão, busca-se aproximar a curva teórica da curva de campo, de forma a alcançar o ajuste mais próximo. No entanto, o ajuste

realizado por inversão, por se basear em métodos puramente matemáticos, pode conduzir a interpretação a resultados ambíguos, podendo produzir um modelo geoeétrico que não é representativo da geologia da área (BORTOLIN, 2009), e para evitar ambiguidades de interpretação, torna-se imprescindível que se tenha dados complementares, como mapas de hidrogeologia, pedologia, e, sempre que possível, dados de poços com a litologia, que podem ser obtidos em bases de dados como o Sistema de Águas Subterrâneas (SIAGAS, 2020).

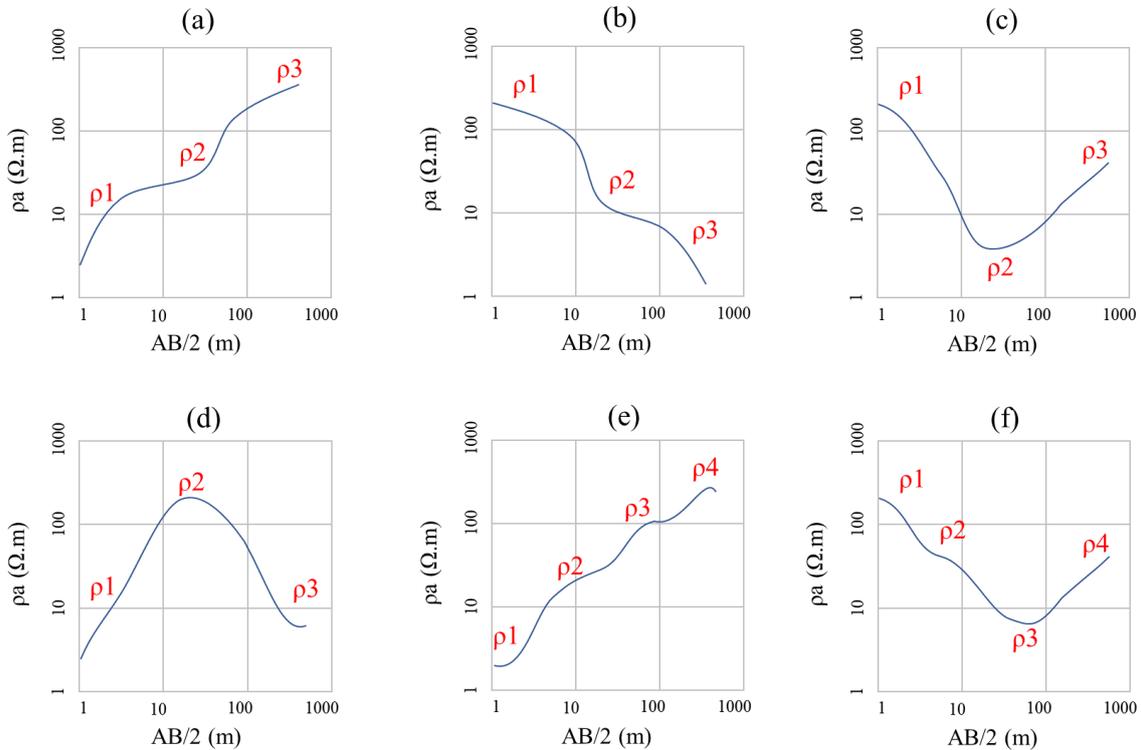
Além do processo de inversão, há também o método comparativo, que consiste em realizar uma aproximação da curva obtida em campo com a distinção das camadas do meio geológico, tomando como base a inclinação da curva, visto que este parâmetro indica variação de resistividade elétrica. Portanto, não se considera, necessariamente, o valor de resistência elétrica isoladamente, visto que a resistência elétrica em profundidade sofre interferência de suas profundidades superiores. Dessa maneira, conhecendo-se o aspecto dos estratos superficiais para se inferir qual a configuração das zonas mais profundas (BRAGA, 2006; 2016).

A configuração das curvas no método comparativo pode se apresentar em diversas morfologias, sendo caracterizadas de três em três camadas, podendo ser curvas do tipo ascendentes, em que os pontos de inflexão da curva apresentam valores de resistividade aparente das camadas mais superficiais são sempre inferiores às mais profundas (tipo A, $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, figura 6a). Também, a configuração pode ser descendente, em que as resistividades aparentes sempre são superiores às camadas mais profundas (tipo Q, $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$, figura 6b).

As curvas também podem apresentar aspecto côncavo (tipo H, $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, figura 6c), ou convexa (tipo K, $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, figura 6d), podendo caracterizarem materiais geológicos de aspectos variáveis. No caso de curvas côncavas, pode-se interpretar, por exemplo, zonas arenosas, para argilosas para embasamento rochoso, sendo este último com altos valores de resistividade elétrica. As curvas convexas podem indicar materiais argilosos em superfície, com a migração para uma zona mais arenosa (BORTOLIN, 2009; BRAGA, 2016).

Para o caso de uma interpretação com mais camadas, emprega-se a combinação dos tipos supracitados (isto é, considera-se a morfologia das três primeiras camadas, e, em seguida, a segunda zona com a terceira e quarta, repetindo-se o mesmo processo com as camadas subsequentes) analisando os pontos de variação de inclinação de três em três, conforme exemplos nas figuras 6e (tipo AA, $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$) e 6f (tipo QH, $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$), sendo, por fim, interpretados comparativamente (BORTOLIN, 2009; BRAGA, 2006; 2016).

Figura 6 – Exemplos de curvas de resistividade aparente de três e quatro camadas. Nas abscissas tem-se a metade da distância dos eletrodos A e B, que corresponde à profundidade relacionada respectivamente à resistividade aparente, que é representada pelas ordenadas.



Fonte: Baseado em Bortolin (2009).

Para que o levantamento geolétrico de uma área seja representativo, deve-se estabelecer um número de SEV que seja apropriado. Braga (2006) diz que o número de SEVS dependendo de dois fatores: área e profundidade de investigação. A equação (15) apresenta um cálculo simplificado de que quantidade mínima de SEV para uma área.

$$n = \left(\frac{\sqrt{A}}{2 \cdot p} \right)^2 \quad (15)$$

Em que:

- n – quantidade de SEV a serem realizadas;
- A – área de trabalho (necessário conhecer a área de investigação);
- p – profundidade de investigação das SEV.

Vale ressaltar que, independentemente da área, o ideal é que a quantidade de pontos sempre deve ser superior a três, para que se considere a variação lateral de valores de resistividade elétrica. Para três SEV e considerando uma investigação geofísica de 100 metros, tem-se que a máxima área que pode ser estudada é de 120.000 m².

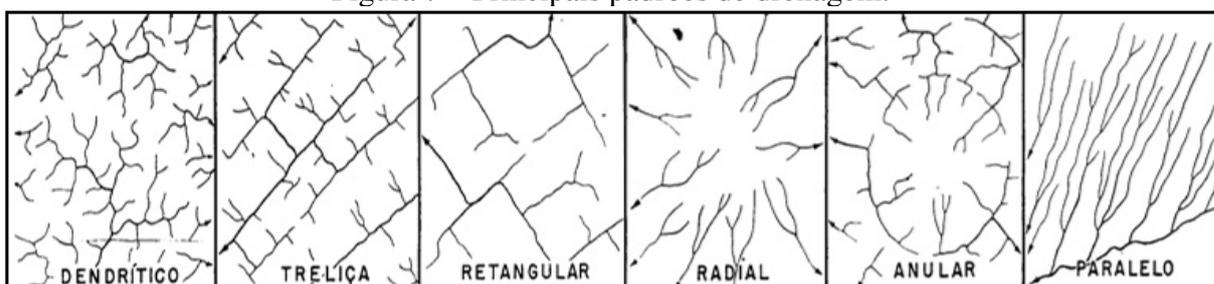
1.4 ASPECTOS DA REDE DE DRENAGEM

Os corpos hídricos podem ser facilmente afetados por contaminantes, e para compreender o grau de susceptibilidade destes, torna-se importante conhecer os diversos padrões de drenagem e suas relações com o meio geológico, porque estes permitem compreender a tendência de mineralização ou dispersão dos contaminantes, dependendo de aspectos topográficos e pedológicos e suas interações com os corpos hídricos (AMARAL; LANA, 2017; SOUZA, 2019).

Inicialmente é preciso entender o que é um canal e qual sua diferença em relação a um rio. Um canal é uma feição resultante da ação do fluxo de água sobre materiais componentes do leito e das margens por onde ocorre o escoamento (SUGUIO, 1998). As águas correntes que brotam das fontes, mais as águas da chuva que se escoam, vão formando pequenos córregos que se juntam, se avolumam e dão origem aos rios (CHRISTOFOLETTI, 1980; LEINZ; AMARAL, 2003).

Os canais são classificados por sua morfologia e padrão. A morfologia é definida pelo tipo de descarga do rio, grau de estabilidade e forma de canal. Assim, os rios podem ser classificados em: retilíneos, meândricos, anastomosados ou entrelaçados (CHRISTOFOLETTI, 1980; HOWARD, 1967). O padrão de drenagem consiste no trajeto formado por drenagens inter-relacionadas. Existem inúmeras classificações de drenagens, no geral os padrões são dendríticos, treliça, retangular, radial, anular e paralelo (HOWARD, 1967), conforme figura 8.

Figura 7 – Principais padrões de drenagem.



Fonte: Adaptada de Christofolletti (1980).

Os caracteres descritivos dos padrões de drenagem frequentemente utilizados são: integração, continuidade, densidade, tropia, controle, sinuosidade, angulosidade e assimetria (HOWARD, 1967), como na figura 9. Destes, os graus de integração, continuidade e de densidade, possuem implicações diretas com o tipo litológico, ao passo que os demais permitem

a identificação de anomalias sugestivas de controle estrutural (DEFFONTAINES; CHOROWICZ, 1991).

Os padrões de drenagem são analisados pelo elemento de estudo definido como bacia hidrográfica, que consiste em uma área de captação natural de água da precipitação. As bacias compõem-se, basicamente, de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que convergem os escoamentos para um único ponto de saída, o qual chamamos de exutório (SCHIAVETTI; CAMARGO, 2002; TUCCI, 2001).

Figura 8 – Principais propriedades de drenagem.

Integração	Continuidade	Densidade	Tropia	Controle	Sinuosidade	Angularidade	Ângulo de Junção	Assimetria
			unidirecional	forte	curvos	alta	agudo	
			bidirecional		mistos	média	reto	
			tridirecional		retilíneos	baixa	obtusos	
			multidirecional desorientada	fraco				
			multidirecional orientada					

Fonte: Soares e Fiori (1976), modificada por Souza (2010).

O emprego da bacia hidrográfica como unidade de estudo ambiental não é recente. Há muito se tem reconhecido as ligações entre as características físicas de uma bacia e a quantidade de água que chega aos corpos hídricos. Dentre as diversas funções da água, destaca-se seu papel como agente modelador e transformador do relevo da superfície terrestre no que se refere ao comportamento mecânico das camadas de solos e rochas, assim, percebem-se a interação entre a água e os elementos geomorfológicos (SCHIAVETTI; CAMARGO, 2002).

Schiavetti e Camargo (2002) abordam a necessidade de que haja o estudo da geomorfologia, geologia e pedologia da bacia hidrográfica para a compreensão e determinação das transformações provocadas pela ação hidrológica. Assim sendo, o solo apresenta-se como fator físico influente no gerenciamento das bacias de drenagem, sendo que sua correta utilização e conservação é de suma importância nos processos que atuam sobre elas.

Por serem capazes de modificar grandes extensões da superfície, os cursos d'água constituem-se no processo morfo genético mais atuante na esculturação da paisagem terrestre. Dentre a grande quantidade de variáveis geomorfológicas que podem ser analisadas, destacam-se a morfometria e a hipsometria (SCHIAVETTI; CAMARGO, 2002).

A morfometria é utilizada com o objetivo de encontrar ligações entre parâmetros tradicionalmente descritivos de uma bacia e seus possíveis condicionamentos. Usada por geólogos e pedólogos, a caracterização morfométrica apresenta algumas variáveis, sintetizadas por Christofolletti (1980) quando se estuda uma bacia, estas mostradas a seguir.

Os parâmetros relativos à geometria da bacia são: área, perímetro e comprimento do eixo da bacia. A área corresponde à delimitação considerando os divisores topográficos e seu plano interior e o perímetro consiste no comprimento do contorno da bacia de drenagem. O comprimento do eixo é a distância entre a foz do rio principal e o ponto mais distante da bacia. Estes parâmetros são empregados para determinar outros parâmetros morfométricos, conforme Christofolletti (1980), Strahler (1957) e Tucci (2001).

A partir dos parâmetros iniciais supracitados, pode-se determinar o coeficiente de compactidade (K_c), dado pela equação (16) apresentada por Strahler (1957), que é a relação entre o perímetro da bacia e um círculo equivalente.

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (16)$$

Em que:

- P – Perímetro da bacia (km);
- A – Área da bacia (km²).

O K_c é sempre um valor maior que 1. Quanto mais próximo de 1, mais circular é a bacia, menor o tempo de concentração e maior a tendência de haver picos de enchente. Conforme, Strahler (1957), tem-se:

- $1,00 < K_c < 1,25$: bacia com alta propensão a grandes enchentes;
- $1,25 < K_c < 1,50$: bacia com tendência mediana a grandes enchentes;
- $K_c > 1,50$: bacia não sujeita a grandes enchentes.

O próximo parâmetro é o índice de circularidade (I_c), que, de acordo com Strahler (1957), é a relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área que

a bacia, apresentado na equação (17). Este parâmetro refere-se à medida de tendência de uma bacia hidrográfica se aproximar da forma circular e diminui à medida que a forma se torna alongada.

$$I_c = 12,57 \cdot \frac{A}{p^2} \quad (17)$$

Outro parâmetro, apontado por Villela e Mattos (1975), é o fator de forma (Kf), que é a relação da forma da bacia e o comprimento do eixo, conforme equação (18).

$$K_f = \frac{A}{L_e^2} \quad (18)$$

Em que:

- L_e – comprimento do eixo da bacia (km).

Quanto menor o Kf, mais alongada é a bacia e, portanto, menos sujeita a picos de enchente, pois o tempo de concentração é maior e, além disso, fica difícil uma mesma chuva intensa abranger toda a bacia. As condições para avaliação do risco de enchentes são:

- $1,00 > K_f > 0,75$: sujeito a enchentes;
- $0,75 > K_f > 0,50$: tendência mediana;
- $K_f < 0,50$: não sujeito a enchentes.

O padrão de drenagem refere-se à disposição espacial dos cursos d'água e é outro fator a ser considerado, que pode dar indicativo de estruturas geológicas que podem interferir de maneira singular na reprodução da drenagem na área. Conforme Christofletti (1980) e Howard (1967) existem diversas classificações, conforme já apresentado na figura 8. Estes padrões auxiliam na compreensão do fluxo de água em superfície.

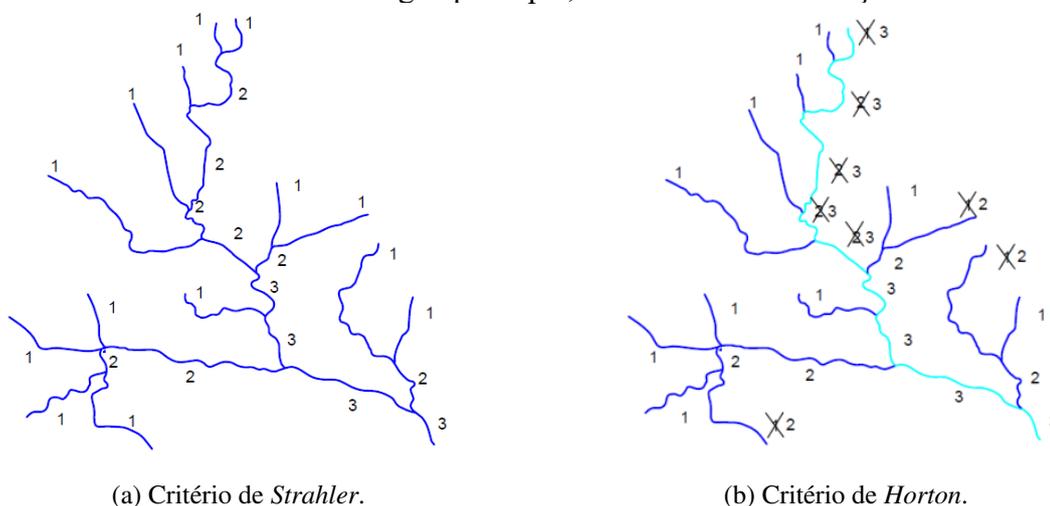
Os parâmetros morfométricos relativos aos cursos d'água são: comprimento do curso d'água principal (L); ordem da bacia; comprimento total dos cursos d'água, que consiste na soma do comprimento de todos os cursos d'água inclusos na bacia; índice de sinuosidade (Is); densidade de drenagem (Dd).

O comprimento do curso d'água principal consiste, basicamente, na extensão do rio principal, de acordo com o critério de *Horton*, com o auxílio do critério de *Strahler*

(CHRISTOFOLETTI, 1980), que, no ambiente da bacia hidrográfica, considera-se a ligação entre os rios, hierarquizando-os, conforme abaixo.

- a) Critério de *Strahler* (Figura 10a): os cursos d'água que não possuem afluentes são classificados como sendo de primeira ordem. Os cursos de segunda ordem se originam do encontro de canais de primeira ordem, podendo ter afluentes de primeira ordem, e assim sucessivamente. No sistema desta classificação, o rio principal e seus afluentes não mantêm o número de ordem na totalidade de suas extensões.
- b) Critério de *Horton* (Figura 10b): os cursos d'água de primeira ordem são aqueles que não possuem afluentes. Os de segunda ordem são aqueles que possuem apenas afluentes de primeira ordem, e assim sucessivamente, a diferença para o critério de *Strahler* é que o curso mais extenso dos de primeira ordem acaba recebendo a reclassificação para a segunda ordem, sendo, assim, estabelecido um critério de desempate. Neste método de classificação, a maior ordem acaba sendo designada ao rio principal da bacia hidrográfica, valendo esta classificação em todo seu comprimento, desde a nascente até a saída da bacia.

Figura 9 – Critérios de classificação dos corpos hídricos, considerando-se que os valores numéricos indicam a ordem do corpo hídrico, a coloração azul indica os canais, sendo que a azul clara indica o curso d'água principal, conforme a classificação de *Horton*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Os dois critérios se complementam, isto é, primeiramente aplica-se o critério de *Strahler* e, posteriormente, o de *Horton* considerando de maior ordem os cursos d'água de maior comprimento, ou mais ramificado. A ordem da bacia é, portanto, a ordem do rio principal. Essa classificação foi usada para o cálculo do índice de sinuosidade do rio principal, que de acordo com Villela e Mattos (1975) corresponde à razão entre o comprimento total do curso d'água

principal e a distância vetorial entre o exutório e a nascente do curso (comprimento do talvegue), expresso na equação (19). Quanto mais próximo de 1, mais retilíneo é o canal.

$$I_s = \frac{L}{L_t} \quad (19)$$

Em que:

- L – Comprimento do curso d'água principal (km);
- L_t – Comprimento do talvegue (km).

A densidade de drenagem (D_d) reflete as influências das características topográficas, litológicas e da cobertura vegetal possibilita saber se a bacia tem boa drenagem ou não e, desta forma, inferir a sua tendência para a ocorrência de cheias. É dada pela equação (20), a seguir (VILLELA; MATTOS, 1975).

$$D_d = \frac{\Sigma L}{A} \quad (20)$$

Em que ΣL é o comprimento total dos cursos d'água. A densidade de drenagem pode ter classificações, desde mal drenada ($0,5 \text{ km/km}^2$) a bem drenada ($3,5 \text{ km/km}^2$), e reflete a permeabilidade do solo, precipitação, cobertura vegetal, ou ação antrópica.

Outra variável importante para a caracterização morfométrica é o Fator de Assimetria (FA), que é apresentado na equação (21), mostrada por Hare e Gardner (1985). Quanto mais próximo de 50, mais simétrica é a bacia, quanto mais distante, menos simétrica, e mais controlada tectonicamente pode ser considerada a bacia.

$$FA = \frac{A_d}{A} \cdot 100 \quad (21)$$

Em que:

- A_d – Área da margem direita do rio principal da bacia (km^2);

O FA é parâmetro complementar ao estudo das anomalias de drenagens, que são manifestações em corpos hídricos que incluem variação abrupta de direção de escoamento, ou meandros comprimidos isolados ou consecutivos. Valores maiores que 50 indicam um provável basculamento da margem direita da bacia, enquanto os menores de 50 indicam provável basculamento da margem esquerda (SOUZA; ROSSETTI, 2011; SOUZA et al. 2013).

Outra característica morfométrica analisada é a hipsometria. A variável geomorfológica relacionada à hipsometria está associada às estimativas de escoamento superficial da água poder ser utilizada, por exemplo, para identificar as áreas de maior produção relativa de sedimentos e no estudo das perspectivas de assoreamento de reservatórios superficiais de uma bacia. Essa produção está estritamente relacionada com os fenômenos de erosão que se produzem na configuração topográfica de uma área de drenagem (MOTTA et al., 2017; SCHIAVETTI; CAMARGO, 2002; TUCCI, 2001).

Os fatores geológicos que influenciam na dinâmica de uma bacia de drenagem são representados, pelo tipo de substrato rochoso e por alguns dos processos exógenos e endógenos que se desenvolvem na crosta terrestre, que são descritos por Schiavetti e Camargo (2002):

- a) Substrato rochoso: através de técnicas de sensoriamento remoto, é possível identificar o controle do substrato rochoso sobre os canais de drenagem. Esse controle pode ser visualizado através dos padrões de drenagem, onde se podem caracterizar cursos associados às camadas superficiais de texturas grosseiras (contornos alongados, menor número de canais, rochas mais permeáveis) ou texturas finas (arranjo mais intrincado e angular, pequeno número de tributários, maior escoamento, densidade maior de canais de drenagem);
- b) Processos exógenos: relacionados à dinâmica superficial, os processos mais influentes no desenvolvimento de canais de drenagem são: climatização química, erosão, transporte e deposição;
- c) Processos endógenos: por meio da observação dos padrões de drenagem, pode-se identificar o controle estrutural (falhas, juntas ou lineamentos estruturais) nos traçados dos canais, que pode variar entre muito baixo (modelo dendrítico) a muito alto (modelo angular, treliça).

A análise pedológica em bacias hidrográficas é importante admitindo-se que seus comportamentos hidrológicos refletem características impostas pelos solos ou materiais superficiais que as abrigue (CHRISTOFOLETTI, 1980). Esses estudos possibilitam a percepção das áreas com maior risco de ocorrência de escoamentos superficiais rápidos ou de escoamentos subsuperficiais mais lentos, assim, pode-se compreender de que maneira os contaminantes, como variável adicional no fluxo hídrico, interagem com o meio (AMARAL; LANA, 2017).

2 OBJETIVOS

Visando sintetizar e visualizar o escopo desta dissertação, definem-se os objetivos. Primeiramente, distingue-se o objetivo geral, coma ideia central e holística do trabalho e diversos objetivos específicos, que integram as ações para que o objetivo geral seja alcançado.

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar assinaturas geofísicas e morfométricas em áreas de disposição de resíduos sólidos na porção setentrional do estado de Roraima (municípios de Alto Alegre, Cantá e Normandia), visando a identificação de possíveis plumas de contaminação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Descrever as características da rede de drenagem no entorno das áreas de alocação de resíduos sólidos, para assim, compor seus aspectos morfométricos por meio de ferramentas de sensoriamento remoto;
- b) Discriminar o tipo litológico pertinente as áreas de destinação de resíduos sólidos nos municípios supracitados (i. e, camadas arenosas, argilosas e possivelmente contaminadas), através do levantamento geofísico (eletroresistivo);
- c) Averiguar se as áreas utilizadas para disposição de resíduos se enquadram nas normas da ABNT;
- d) Avaliar os efeitos da contaminação advinda dos lixões nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos por meio da integração dos dados geofísicos e morfométricos.

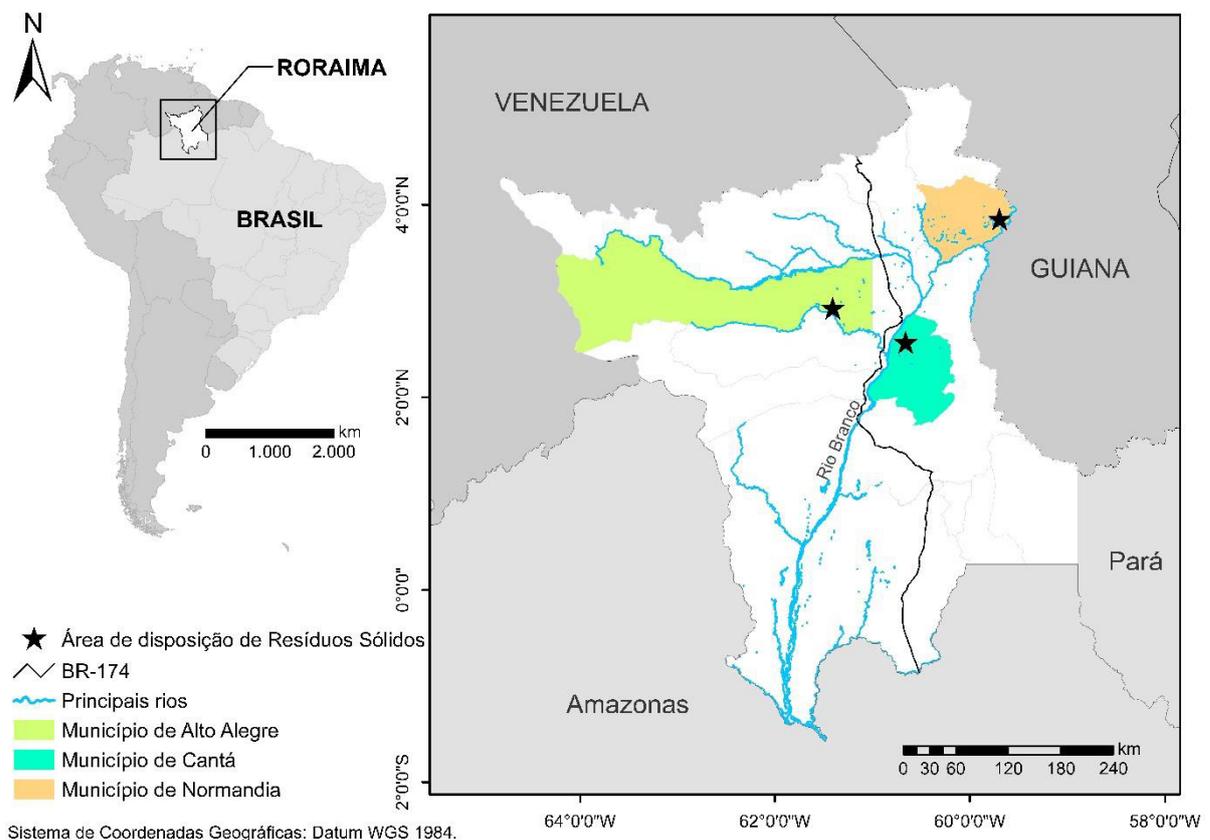
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta o conjunto de materiais e métodos empregados na pesquisa, considerando, respectivamente, a caracterização da área de estudo apresentada na figura 1 (incluindo generalidades, vias de acesso, aspectos fisiográficos, geologia, geomorfologia, hidrogeologia), e os procedimentos e técnicas empregados (sensoriamento remoto e levantamento eletrorresistivo), lançando mão dos conceitos apresentados na seção 1.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estado de Roraima (Figura 10) localiza-se na Região Norte do Brasil, com população estimada de 605.761 habitantes e extensão territorial de 223.644,527 km², tendo densidade demográfica de 2,7 hab./km² (IBGE, 2019) e composto por 15 municípios, sendo um dos Estados mais recentemente criados do país (estabelecido pela Constituição Federal em 1988) e o menos denso demograficamente.

Figura 10 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Próprio autor (2020).

A economia de Roraima, de acordo com dados da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento de Roraima (SEPLAN, 2020) é baseada, predominantemente, por comércio e serviços, com boa parcela atribuída ao funcionalismo público e a expansão do agronegócio, tendo o Produto Interno Bruto (PIB) de 12,1 bilhões de reais em 2017.

A capital, Boa Vista, concentra a maior parte da população, com quase 400 mil habitantes. O estado de Roraima faz fronteira a norte e oeste com a Venezuela, a Leste com a Guiana, e a sul com os estados Pará e Amazonas (Figura 10). O acesso pode ser realizado por vias terrestre (rodovia federal, BR-174), aérea e fluvial através do rio Branco, sendo este navegável até o município de Caracará em estação chuvosa.

O rio Branco é bastante denso, formado pela união dos rios Uraricoera e Tacutu e com comprimento de 45.530 km². Ele corta o Estado de norte a sul (isto é, NE-SW), sendo o principal abastecedor do Sistema Aquífero Boa Vista, bem como da população roraimense (WANKLER; EVANGELISTA; SANDER, 2012).

O território de Roraima foi marcado pelo contexto de modernização da Amazônia Legal, que implicou em um processo de ocupação especialmente a partir da década de 1980, por meio do garimpo, trazendo implicações também em outras atividades, como setores agropecuários, madeireiros e fundiários, que intensificou as taxas de urbanização e conflitos sociais, visto que muitas áreas consistem em terras indígenas, ou áreas devolutivas. A população de Roraima é predominantemente urbana, e sendo um Estado recente, enfrenta desafios para o desenvolvimento de sua infraestrutura (LIMA et al., 2016).

Apesar de sua estrutura ainda incipiente em diversos campos da economia, por ser fronteiriço passou por um intenso processo de migração (aproximadamente 10% da população do Estado), principalmente venezuelana (vale destacar também a migração haitiana e guianense, ainda que menos expressiva), num contexto de grande crise humanitária, econômica, política e social desde 2014, submetendo a administração de diversos municípios a um processo de sobrecarga de seus serviços públicos, e, conseqüentemente, aumentando a geração de resíduos sólidos (CAMARGO; HERMANY, 2018).

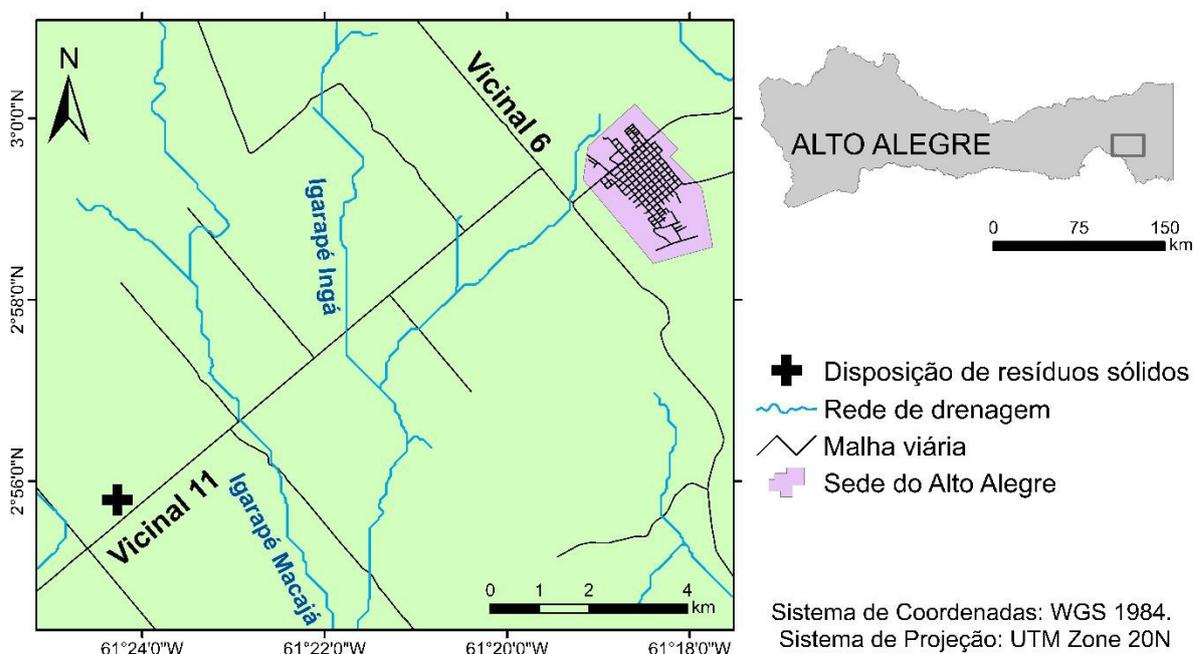
3.1.1 Generalidades e vias de acesso

Como já mencionado, este trabalho se concentra em três municípios da porção setentrional do estado de Roraima: Alto Alegre, Cantá e Normandia, cujas características são abordadas mais detalhadamente nas próximas seções.

O município do Alto Alegre localiza-se no noroeste do estado de Roraima, coordenadas $02^{\circ} 58' 48''$ N (latitude) e $61^{\circ} 17' 31''$ O (longitude), compreendendo área de 25.566,845 km². Faz fronteira em território roraimense com os municípios de Amajari a norte, Mucajaí a sul e Boa Vista a leste, a sudoeste com Iracema e a oeste com o país da Venezuela. A população é de 15.510 habitantes (IBGE, 2019), distando até a capital Boa Vista em torno de 87 km, sendo acessado pela rodovia estadual RR-205 em trecho completamente pavimentado. Os resíduos sólidos gerados no município são dispostos em uma área localizada a 15 quilômetros da sede municipal (Figura 11), acessada diretamente pela Vicinal 11.

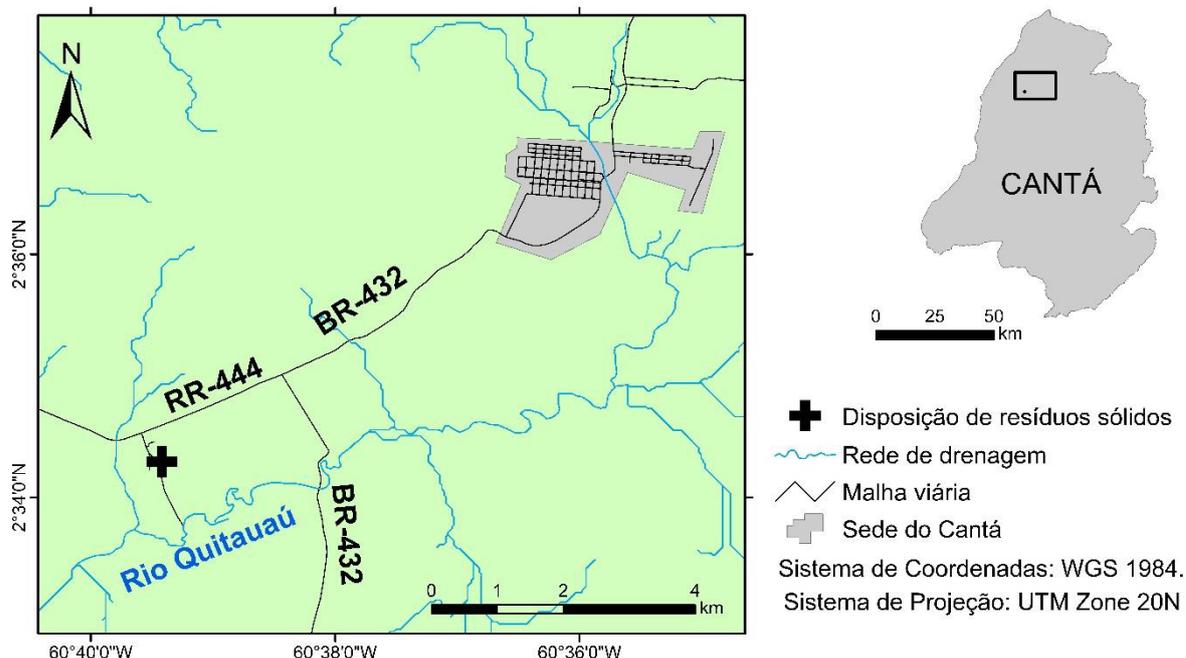
O município do Cantá localiza-se na Região Metropolitana de Boa Vista (capital do estado de Roraima), com coordenadas a $02^{\circ} 36' 36''$ N (latitude) e $60^{\circ} 35' 49''$ O (longitude), tem extensão territorial de 7.664,797 km². Sua população é de 18.335 habitantes (IBGE, 2019). Possui fronteira com Boa Vista a noroeste, Bonfim a nordeste e leste, Caracaraí a sul, e Iracema e Mucajaí a oeste. A distância do município de Cantá até a capital Boa Vista é de 30 km, sendo o acesso realizado em via pavimentada através da rodovia federal BR-401. O Município tem área de disposição de resíduos sólidos que dista cerca de 8 km da sede, sendo que seu acesso é feito pela BR-432 e entrada pela RR-444, que dá acesso à Vila Serra Grande 1 (Figura 12).

Figura 11 – Área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre.



Fonte: Próprio autor (2020)

Figura 12 – Área de disposição de resíduos sólidos do município de Cantá.



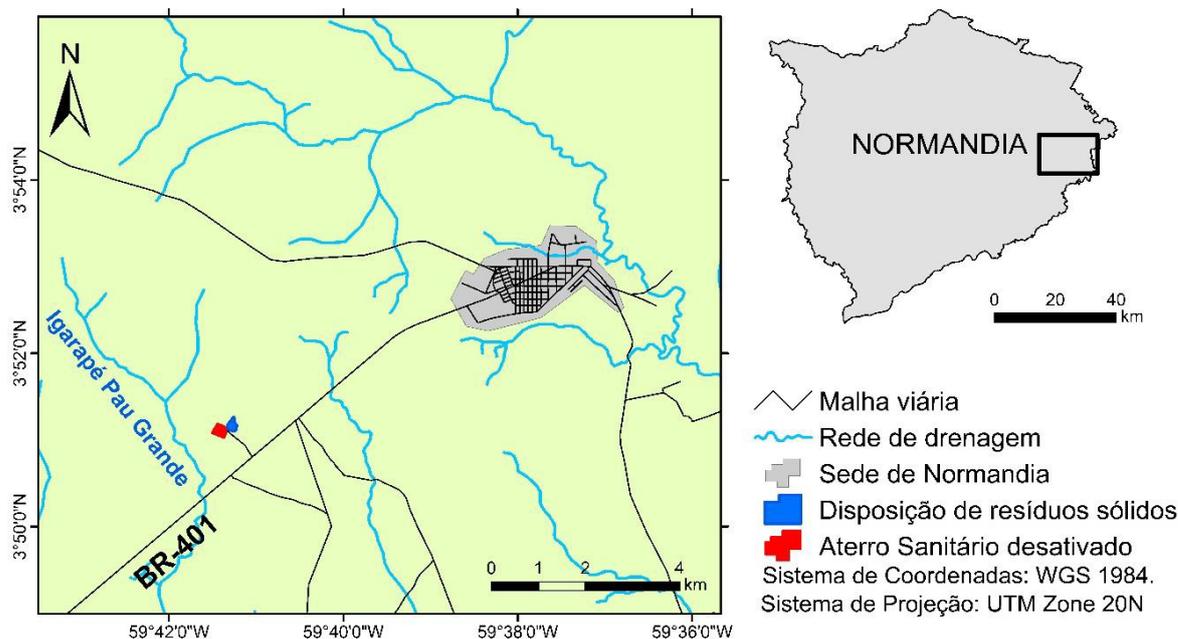
Fonte: Próprio autor (2020).

O município de Normandia localiza-se na porção setentrional de Roraima, com coordenadas a $03^{\circ} 52' 51''$ N (latitude) e $59^{\circ} 37' 22''$ O (longitude), com área de 6.966,777 km². Possui como municípios limítrofes Boa Vista e Bonfim (ao sul), Uiramutã (ao norte), Pacaraima (ao oeste), também faz fronteira com a Guiana (ao leste). Sua população é de 11.290 habitantes (IBGE, 2019). Dista à capital Boa Vista em 185 km, sendo o acesso pela rodovia federal BR-401, que, a partir do trecho que dá acesso ao município de Bonfim, não é pavimentada.

Normandia é o único município de Roraima que apresenta um aterro sanitário construído, mas este se encontra totalmente desativado desde a finalização do empreendimento, que teve sua execução finalizada em 2013, vale ressaltar que este nunca teve alocação de resíduos desde a finalização da obra, que foi realizada em formato de pequeno porte em trincheira, nos padrões da NBR 15849 (ABNT, 2010).

Os resíduos sólidos são alocados ao lado da obra (isto é, o aterro sanitário desativado), em sua parte externa, mais informações podem ser encontradas na seção 4.3. A área pode ser acessada antes mesmo de chegar à sede de Normandia, pela BR-401, quando se parte da cidade de Boa Vista, por uma estrada não pavimentada em sua margem esquerda, que dista cerca de 7 km da sede do município e cerca de 0,5 km do Igarapé Pau Grande (Figura 13).

Figura 13 – Área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia.



Fonte: Próprio autor (2020).

3.1.2 Aspectos fisiográficos

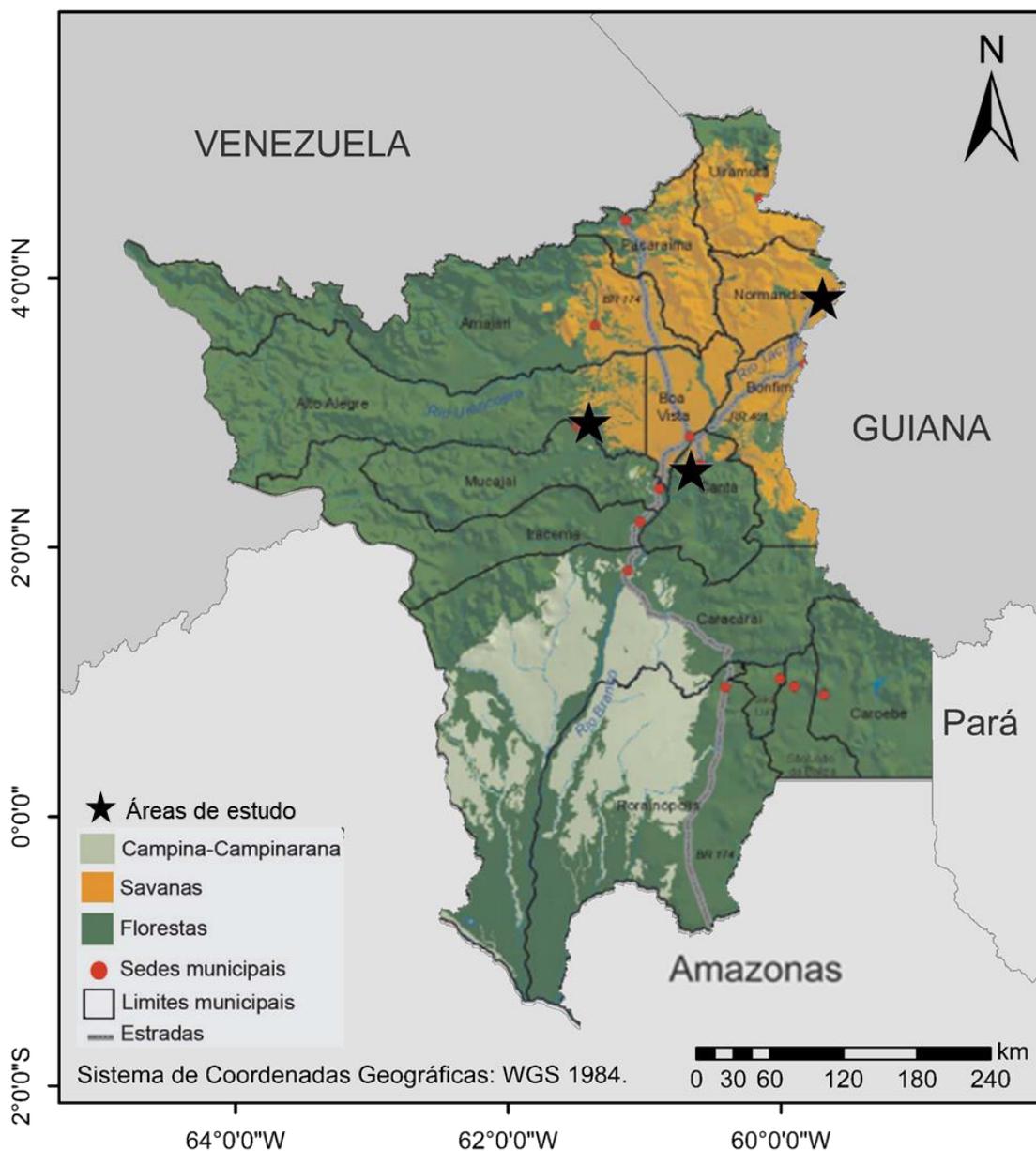
O clima de Roraima é predominantemente tropical (ALVARES et al., 2014), sendo que sua precipitação anual intercala períodos úmidos, de 4 a 5 anos, e secos, de 2 a 3 anos, sendo este comportamento associado aos eventos do *El Niño* e *La Niña* (SILVA et al., 2015). Enquanto, o município de Alto Alegre está inserido, conforme a classificação *Köppen-Geiger* (KOTTEK et al., 2006) em tropical úmido (Am), o município de Cantá e Normandia é tropical de savana (Aw).

Ao longo do ano, de acordo com Nimer (1991), o regime de precipitação é definido por duas estações: seca (de outubro a março) e chuvosa (de abril a setembro). A temperatura média de Alto Alegre é de 26,8 °C e a precipitação média anual é de 1.757 mm, no Cantá é de 27,2 °C e 1.567 mm, e em Normandia 27,3 °C e 1.219 mm.

Situado no bioma amazônico, o estado de Roraima possui fitofisionomias que variam desde savanas (localmente denominada como lavrado) a florestas estacionais semidecíduais e tendo essa variedade atribuída a diversos fatores, como a pedologia, relevo, incidência do fogo e variações climáticas no período geológico denominada de Quaternário (MAYLE; POWER, 2008; SCHAEFER, 1997).

Conforme se observa a figura 14, o município de Normandia encontra-se numa área de savana. As savanas compõem 17% do território roraimense, ocupando quase toda a porção nordeste e são caracterizadas pela predominância de gramíneas, permeadas por arbustos, tendo sua composição florística influenciada por fatores topográficos e nível freático (BARBOSA; CAMPOS, 2011; MENESES; COSTA, 2012), favorecidas pela composição de solos predominantemente distróficos, relevo plano, recorrência de fogo, apesar das condições climáticas que, à priori, favorecerem formação de florestas (SCHAEFER, 1997).

Figura 14 – Distribuição da vegetação na área de estudo.



Fonte: Adaptado de Barbosa e Bacelar-Lima (2008) e Barbosa e Campos (2011).

Os solos da área no entorno do município de Normandia são classificados como planossolo háplico (IBGE, 2005b), que se caracterizam como mal drenados, com horizonte superficial, textura mais leve, seguido de um horizonte adensado e com alta concentração de argila dispersa, favorecendo a retenção de água (SANTOS et al., 2018). Estes ocorrem em áreas de relevo plano, que favorecem, sazonalmente, o excesso de água, mesmo que de curta duração. A combinação destas características performam o ambiente lacustre desta porção do lavrado, com predominância de feições agradacionais (planícies), com cotas altimétricas inferiores a 250 metros (MORAIS; CARVALHO, 2015).

Em contraste, os municípios de Alto Alegre e Cantá estão áreas que, conforme Meneses e Costa (2012) são classificadas como de transição entre savana e floresta estacional e semidecidual, havendo intercalações de floresta descontinuamente, geralmente manifestadas nas regiões de mais alta topografia, ou em veredas, concentrando-se em locais com corpos hídricos com maiores extensões e/ou volume hídrico.

Estas áreas apresentam, predominantemente, argissolos com coloração que variam de amarelo a vermelho-amarelo, distróficos com textura arenosa e fração argila de baixa atividade, e estes se caracterizam como fortemente drenados, de caráter alumínico, com fácil diferenciação entre horizontes, sendo que superficialmente são mais arenosos, conforme Santos et al. (2018). Além disso, quando se considera os fragmentos florestais, os solos apresentam maiores teores de fósforo, pH mais ácido e alumínio trocável, sendo menos resistentes à penetração e alto teor de umidade, de acordo com Feitosa et al. (2016).

3.1.3 Contexto Geológico

O estado de Roraima encontra-se na porção setentrional do cráton Amazonas, centralizado no escudo das Guianas, contendo exposições rochosas que datam desde o período Paleoproterozoico até o Fanerozoico (REIS; FRAGA; ALMEIDA, 2014), sendo compartimentado tectonicamente em quatro domínios litoestruturais: Parima, Guiana Central, Uatumã-Anauá e Urariquera, conforme Reis e Fraga (1998), Reis et al. (2003) e Pinto et al. (2012).

O domínio Parima é caracterizado por forte estruturação NW-SE inserido na região oeste de Roraima e sugere sua integração em um mega-arranjo de zonas de cisalhamento em um quadro de esforços transpressivos, como Reis e Fraga (1998) versaram em Reis et al. (2003, p. 126) dizem que o domínio apresenta “xistos, quartzitos, metaconglomerados e metasiltitos

(com caráter turbidítico), além de anfibólitos e basaltos com características petrográficas de komatiitos”.

Concentrado na porção centro-norte do Estado, o domínio Guiana Central apresenta lineamentos estruturais NE-SW, com litologias que datam do período Paleoproterozoico e Mesoproterozóico. Este domínio é predominantemente encoberto por sedimentos cenozoicos ou desvanecidos por intrusões graníticas, associados às formações Boa Vista e Areias Brancas (REIS et al, 2003). De acordo com o mapa geológico do estado de Roraima IBGE (2005a), os municípios de Alto Alegre e Cantá encontram-se no domínio supracitado (Figura 15), inseridos na Suíte Metamórfica Rio Urubu, com grau metamórfico de alto a médio.

A Suíte Metamórfica Rio Urubu é um termo para designar as rochas ortognaíssicas aflorantes na região do rio de mesmo nome. Esta engloba grande parte das rochas caracterizadas como ortognaisses. Corresponde a um conjunto de rochas biotita gnaisses e biotita hornblenda gnaisses, incluindo subordinadas lentes de hiperstênio gnaisses e leucognaisses. Há predominância de biotita e biotita-hornblenda gnaisses e integram duas proeminentes faixas ao longo do domínio Guiana Central (REIS; FRAGA, 1998).

O domínio Anauá-Jatapu ocupa a porção setentrional de Roraima, com lineamentos estruturados em E-W, WNW-ESSE e NW-SE, onde predominam granitos e vulcanitos e uma cobertura sedimentar em locais fronteiros como a Guiana e Venezuela (REIS et al, 2003).

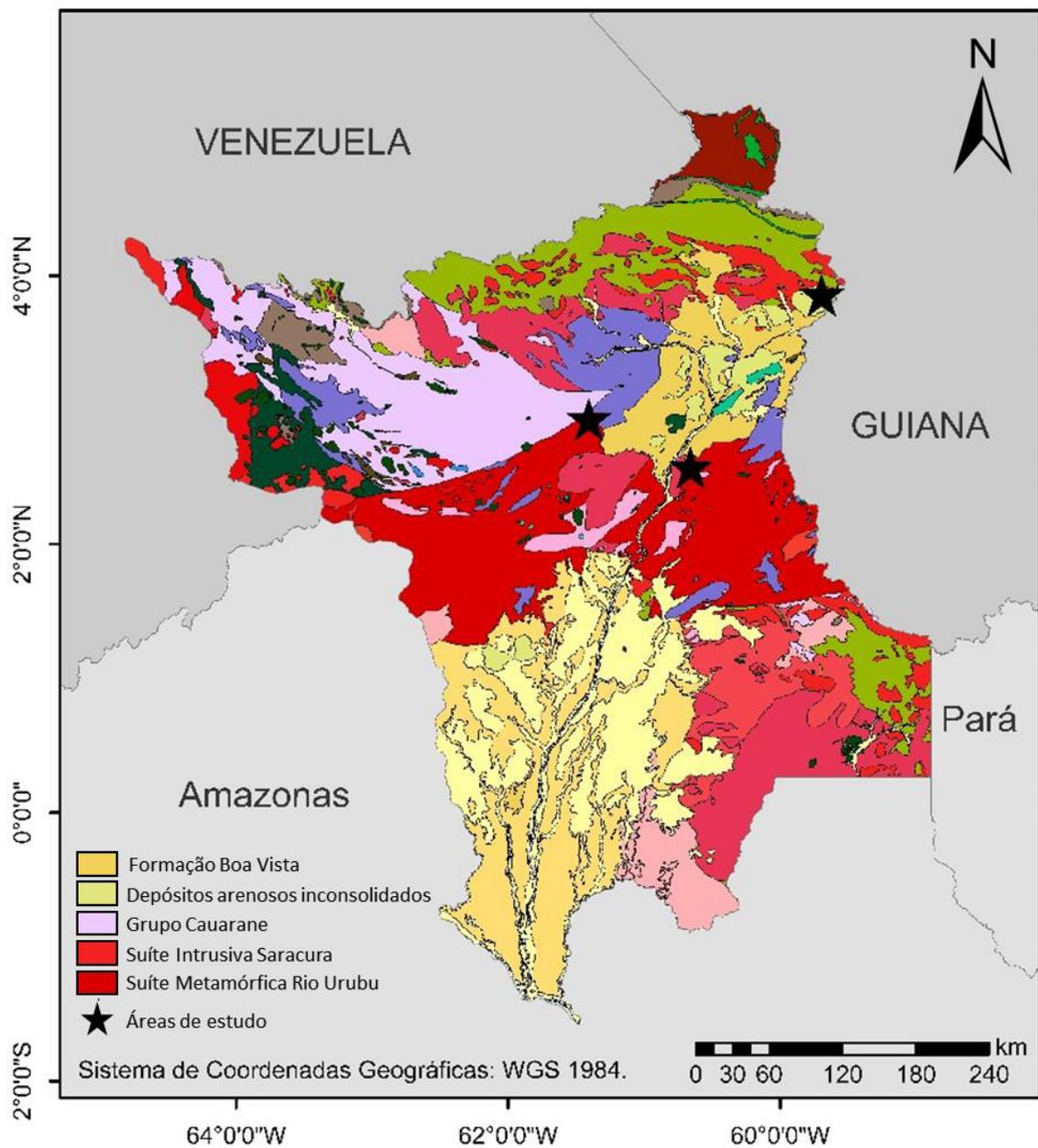
Concentrado na porção sudeste do estado, o domínio Urariquera caracteriza-se por um conjunto de lineamentos com direções NW-SE e NE-SW, superimpostos em rochas predominantemente granitoides. Apresenta metamorfismo remanescentes de sequências de rochas supracrustais pós-arqueanas, compondo arenitos, sedimentos químicos e rochas vulcânicas básicas, submetidas a uma fase de deformação e metamorfismo regional, estes representando a manifestação do Grupo Cauarane (REIS; FRAGA, 1998; REIS et al., 2003).

A Formação Boa Vista consiste numa cobertura sedimentar, que se assenta sobre os domínios Urariquera e Guiana Central, de idade cenozoica (REIS et al., 2003). O estudo de Menezes et al. (2020) aponta que esta formação sedimentar foi favorecida por uma última fase tectonicamente ativa na Bacia do Tacutu (Hemi-Gráben Tacutu), submetida a movimentos transcorrentes e compressivos, fornecendo suprimento sedimentar cascalhoso, e, posteriormente a essa fase ativa, exposta a agentes erosivos que iniciou o processo de aplainamento do relevo, compondo um sistema fluvial.

A área próxima à sede do município de Normandia (Figura 15) encontra-se sobre a referida cobertura sedimentar sobre a Suíte Intrusiva de Saracura (esta composta por granitoides pouco deformados), com a presença de sedimentos inconsolidados com intercalações de níveis

conglomeráticos e de concreções lateríticas, de acordo com o mapa geológico do estado de Roraima do IBGE (2005a). De acordo com Silva e Porsani (2006), as litologias existentes na Formação Boa Vista são arenito, laterito, argilitos e conglomerados.

Figura 15 – Mapa geológico do estado de Roraima.



Fonte: Adaptado de IBGE (2005a) e SIAGAS (2020).

3.1.4 Contexto Geomorfológico

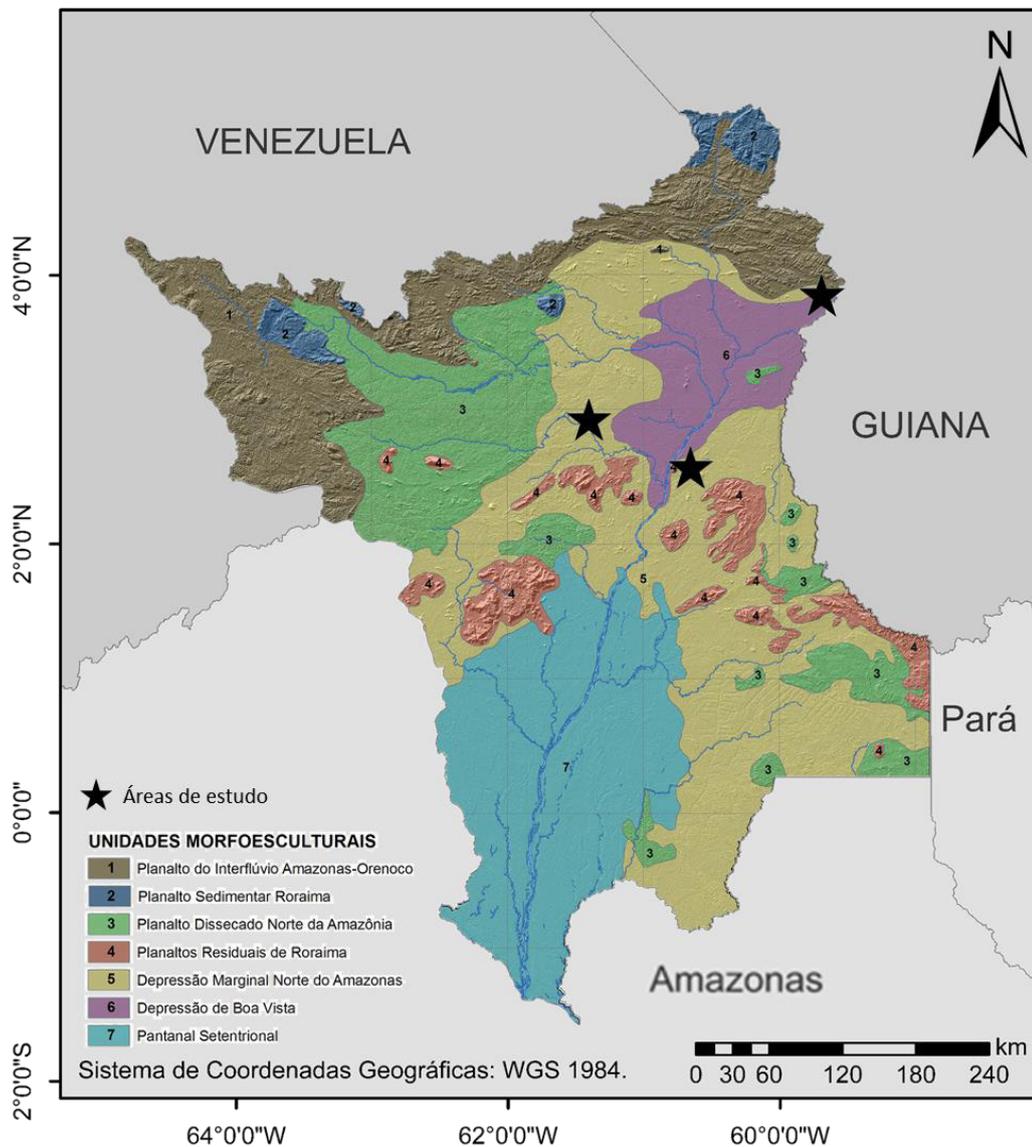
A extensão territorial do estado de Roraima pode ser compartimentada geomorfologicamente em dois sistemas principais: 60% a processos denudacionais e 40% a processos agradacionais. Os ambientes agradacionais são caracterizados por planícies fluviais bem desenvolvidas, presente na região nordeste do Estado, no sistema de drenagem do Rio Branco, com áreas de savanas (lavrado) a nordeste e campinarana ao sul, com presença de lagos de paleocanais, onde ocorrem processos de erosão e ilhas em processo de intemperismo. Ao norte do Estado, predominam-se os sistemas denudacionais, em que há forte controle estrutural e forte dissecação, com vales e rios encaixados (CARVALHO, 2014).

Ainda, outra maneira de classificar o território de Roraima conforme Barbosa (1975) é por unidades morfoestruturais, que possuem conjuntos litológicos de natureza e idades diferentes. São elas: Terrenos Proterozoicos do Escudo das Guianas (subdividida em: Planalto do Divisor Amazonas-Orenoco, Planalto Sedimentar de Roraima, Planalto Dissecado Norte da Amazônia, Planaltos Residuais de Roraima e Depressão Marginal Norte do Amazonas) e Domínio das Coberturas Sedimentares Fanerozoicas (subdividida em: Depressão de Boa Vista e Pantanal Setentrional), com as subdivisões, Ladeira e Dantas (2014) caracteriza-as como unidades morfoesculturais.

As áreas de estudo situam-se na Depressão Marginal Norte do Amazonas (Alto Alegre e Cantá) e na Depressão de Boa Vista (Normandia), conforme a figura 16. A Depressão Marginal Norte do Amazonas é a mais predominante do estado, cobrindo cerca de 31% de sua extensão territorial. Caracteriza-se como uma superfície aplainada e conservada, com incidência pontual de serras, como a Serra do Cantá e Serra Grande. Nas regiões próximas à sede de Alto Alegre, apresentam igarapés intermitentes e lagos que podem estar confinados em regiões rebaixadas, sustentados por crostas lateríticas. Os padrões de drenagem são variados (LADEIRA; DANTAS, 2014).

Com cobertura sedimentar e, com aspecto deposicional, a Depressão de Boa Vista consiste numa superfície aplainada, que é resultado de um fenômeno de pediplanação sobre a bacia sedimentar de Boa Vista e abrange cerca de 7% da extensão territorial do Estado. espalhados pela superfície pediplanada, relevos residuais (*inselbergs*), esculpido em rochas magmáticas ou metamórficas do embasamento. Sua rede de drenagem é composta por igarapés intermitentes e lagos como é o caso de Normandia (CARVALHO; CARVALHO; MORAIS, 2016; LADEIRA; DANTAS, 2014).

Figura 16 – Unidades morfoesculturais do estado de Roraima.

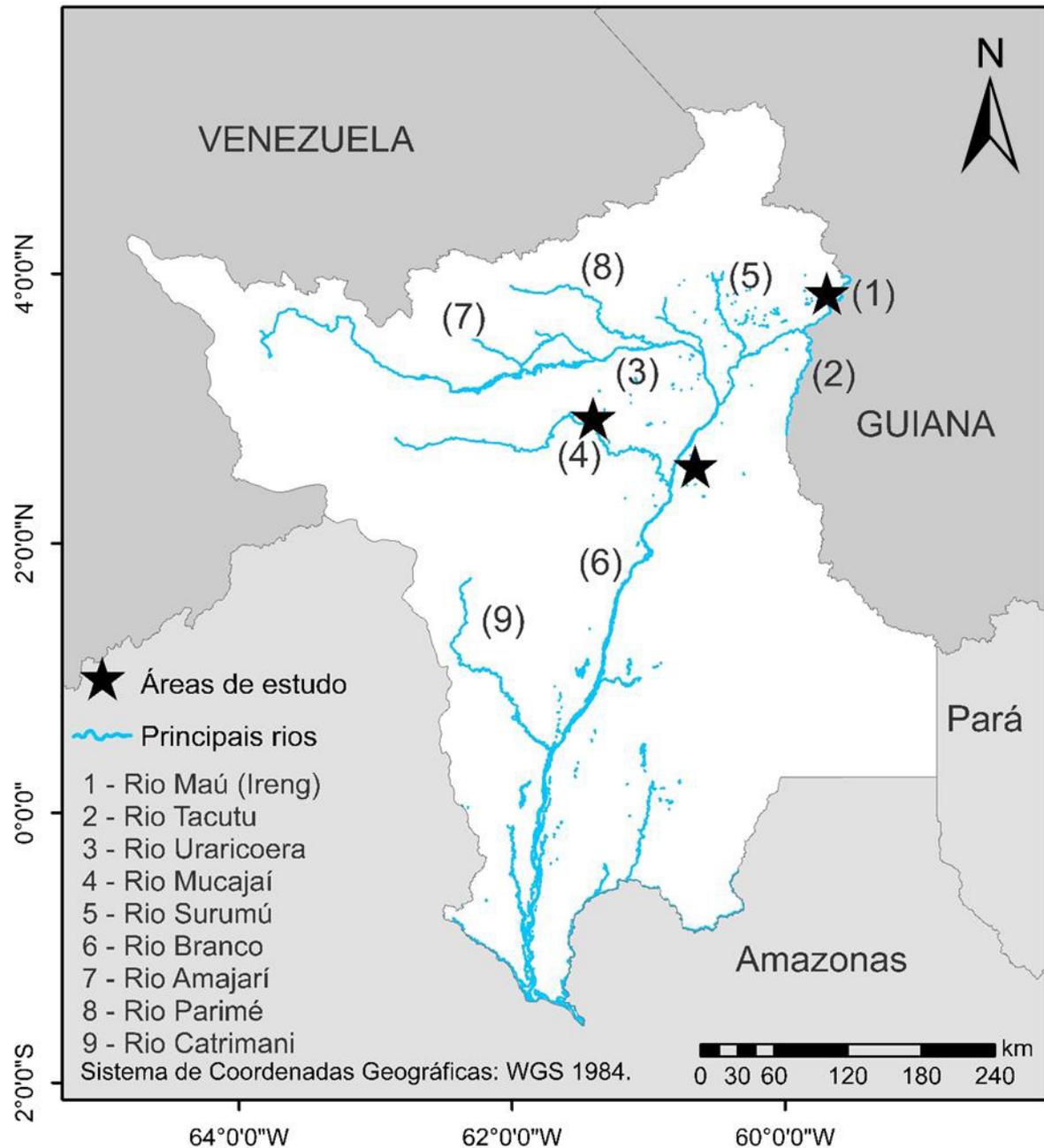


Fonte: Adaptado Ladeira e Dantas (2014).

3.1.5 Contexto hidrográfico e hidrogeológico simplificado

Constituinte da hidrografia do estado de Roraima, o Rio Branco (Figura 17) configura-se como seu principal corpo hídrico e tem suas nascentes no Escudo das Guianas e deságua no Rio Negro, em sua margem esquerda (LE MOS; VIEIRA; FERRAZ, 2017). A hidrografia atua como modeladora dos ambientes paisagísticos de Roraima, dissecando o relevo na direção predominante NE-SW (CARVALHO; CARVALHO; MORAIS, 2016).

Figura 17 – Principais rios do estado de Roraima.



Fonte: Próprio autor (2020).

O Rio Branco é fruto da confluência dos rios Uraricoera e Tacutu, tendo como principais tributários pela margem direita: Mucajaí, Ajarani, Água Boa do Univini e Catrimani; e pela margem esquerda: Quitauaú, Cachorro, Anauá e Itapará. A bacia do Rio Branco está quase completamente no território roraimense, abrangendo uma pequena faixa da Guiana, por meio dos rios Maú (ou *Ireng*) e Tacutu, que são fronteira internacional (LEMOS; VIEIRA; FERRAZ, 2017).

Dessa maneira, pode-se dizer que os recursos hídricos de Roraima são quase que integralmente inseridos na Bacia Hidrográfica do Rio Branco. Uma informação interessante que pode ser observada na figura 17 é que o Rio Tacutu inicialmente tem um fluxo S-N, mas é capturado pela bacia sedimentar do Tacutu e acompanha o fluxo de escoamento preferencial NE-SW na Formação Boa Vista (COSTA; FALCÃO, 2011).

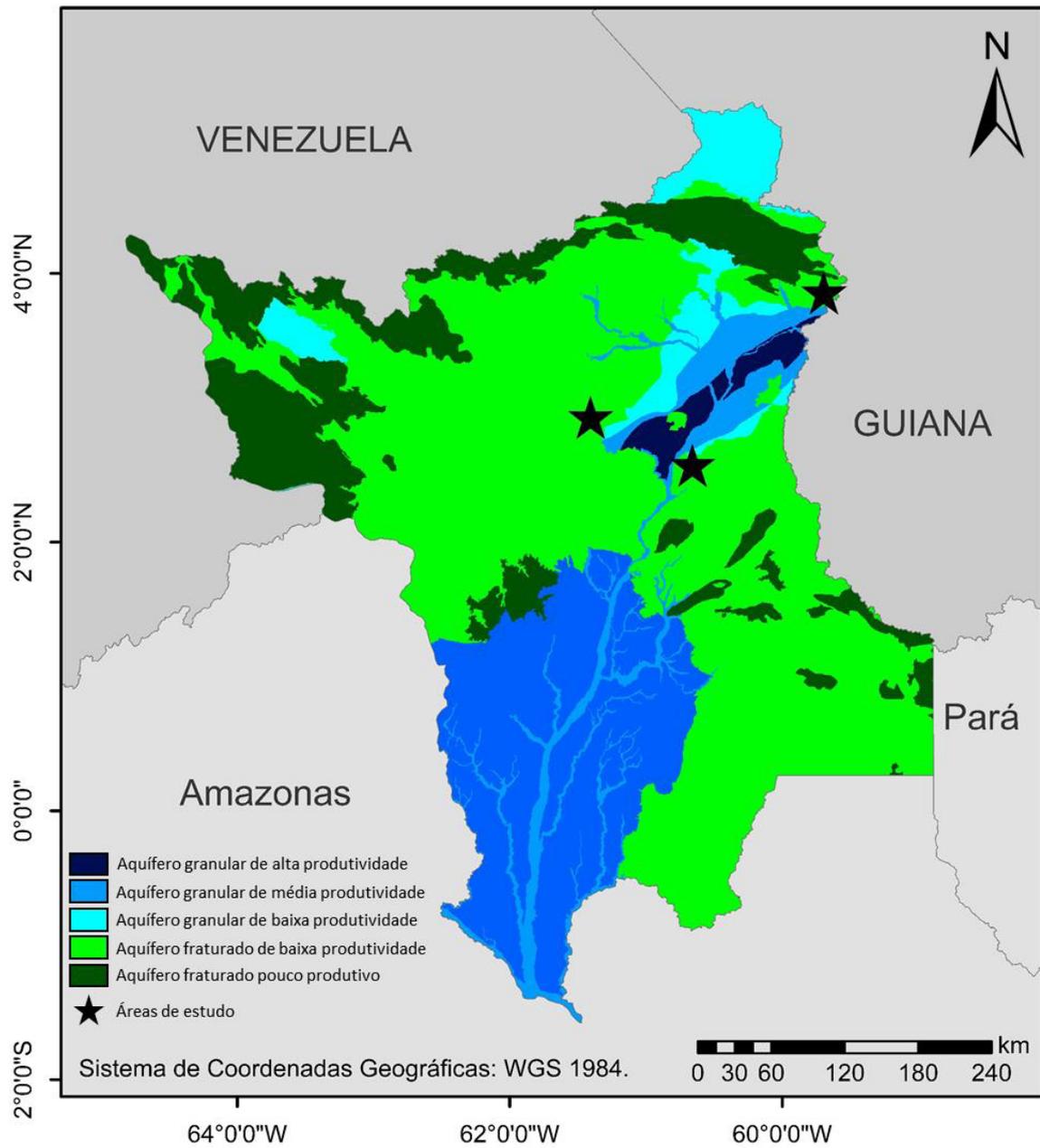
Nas áreas de savana, os sistemas lacustres predominantes também estão localizados na Formação Boa Vista, composta por depósitos de sedimentos quaternários, com fraca dissecação e mal drenados, proporcionando o estoque de água durante o período chuvoso, gerando lagos intermitentes (MORAIS; CARVALHO, 2015). Esses lagos fragmentam o lavrado em cotas altimétricas mais baixas, sendo que no período chuvoso apresentam características peculiares: encontram-se interconectados tanto entre si quanto com a rede de drenagem, separando-se em períodos de estiagem, formando lagos perenes isolados (CARVALHO, 2014).

Os reservatórios de águas subterrâneas das áreas de estudo (Figura 18) caracterizam-se por serem descontínuos, cujas informações ainda são escassas, sendo que as áreas mais altas do relevo são responsáveis pela recarga dos aquíferos. As camadas litológicas superiores podem ter condutividade hidráulica entre 10^{-6} a 10^{-5} cm/s, com produtividade localmente baixa, com vazão variando entre 1 e 10 m³/h, isto é, o fornecimento contínuo dificilmente é garantido, com base em dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2016a; 2016b).

O sistema aquífero que está a jusante das áreas de estudo é o Sistema Aquífero Boa Vista – SABV (Figura 18), que são aquíferos granulares com produtividade gradualmente variável, podendo apresentar algumas discontinuidades, que se concentram no *Hemi-Gráben* do Tacutu (CPRM, 2016a; 2016b).

De acordo com Wankler, Evangelista e Sander (2012), o SABV caracteriza-se como um aquífero livre a semiconfinado, com alta condutividade hidráulica, podendo atingir vazões de 79,2 m³/h, apresentando sedimentos coluvionares e aluvionares e sedimentos constituídos de areias e argilas semi-consolidadas da Formação Boa Vista, além de rochas sedimentares da Formação Serra do Tucano, apresentando nível freático raso e, por isso, altamente vulnerável a contaminação, especialmente no período chuvoso. Um estudo realizado por Souza e Carvalho (2017) na porção sudoeste do SABV evidenciou que o lençol pode atingir cotas de 3,0 m abaixo do nível do terreno e nos horizontes superficiais, as camadas apresentam alta porosidade (presença de concreções lateríticas) o que potencializa o risco de percolação de contaminantes de forma gravitacional e rápida, diluindo-se no nível freático.

Figura 18 – Hidrogeologia do estado de Roraima.

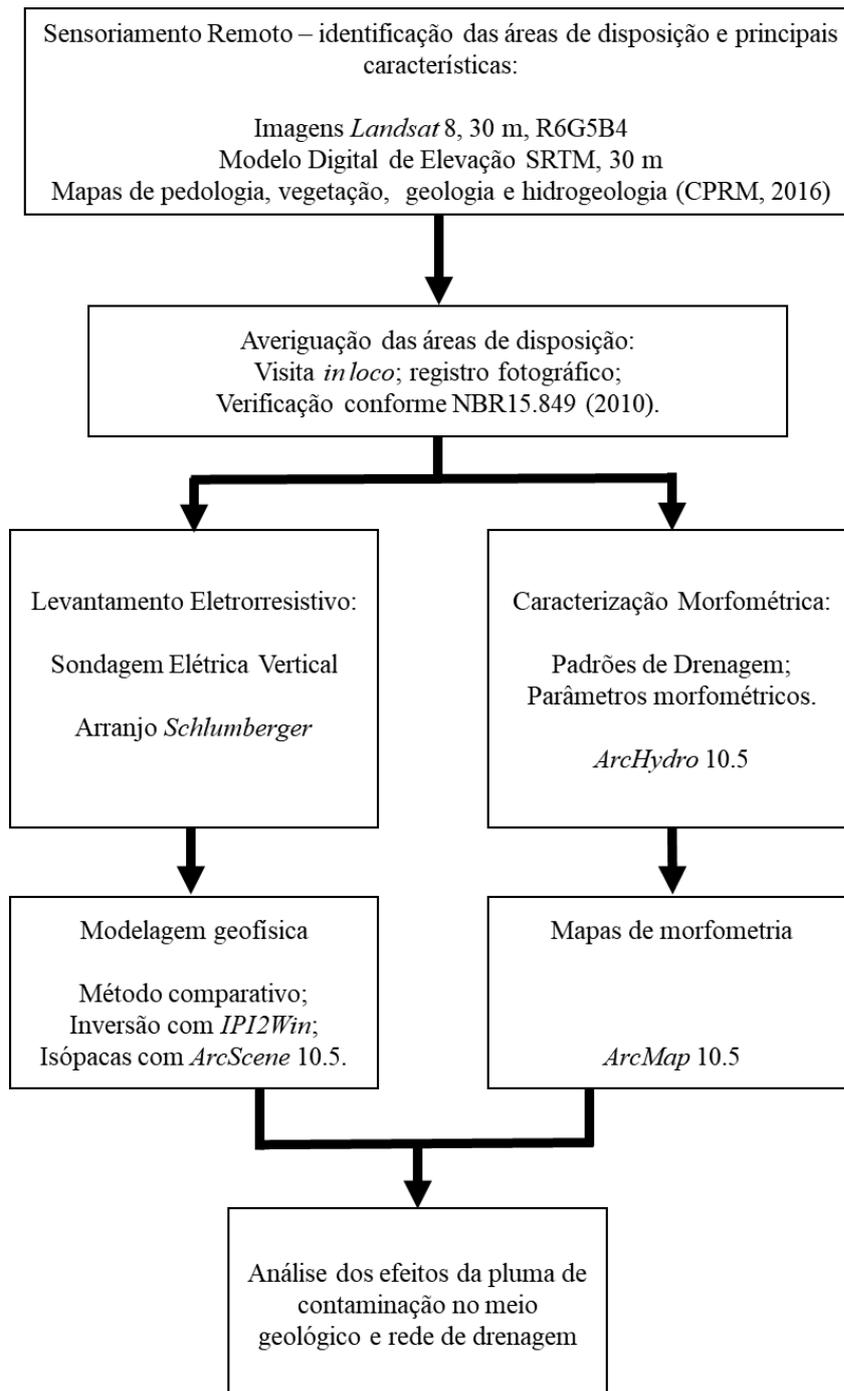


Fonte: Adaptado de CPRM (2016a; 2016b) e SIAGAS (2020).

3.2 PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS

O trabalho em escopo fora realizado usando metodologia interdisciplinar, associando dados geofísicos e morfométricos das áreas estudadas (municípios de Alto Alegre, Cantá e Normandia), conforme fluxograma da figura 19.

Figura 19 – Fluxograma simplificado das etapas executadas.



Fonte: Próprio autor (2020).

3.2.1 Sensoriamento Remoto (SR)

Para a correta identificação das áreas de disposição de resíduos sólidos nos três municípios roraimenses, foram empregadas ferramentas de sensoriamento remoto, e com a localização destes pôde-se realizar a caracterização do entorno dessas áreas.

Os dados de sensoriamento remoto consistem em imagens orbitais de satélite *Landsat 8* ETM+, disponível no site *Earth Explorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), de 7 de dezembro de 2015, com 30 metros de resolução espacial, e Modelos Digitais de Elevação (MDE), com 30 metros de resolução espacial adquiridas da Missão Topográfica de Radar *Shuttle* (SRTM), também por meio do *site Earth Explorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), obtidas em 29 de agosto de 2019.

No *software ArcMap* 10.5 aplicou-se técnicas foto-interpretativas, que consistem no reconhecimento dos elementos naturais da paisagem (drenagem e relevo), os quais desempenham papel fundamental no desenho da paisagem natural da superfície terrestre, bem como suas disposições, que refletem a organização estrutural da crosta. Essas feições da superfície do terreno foram vetorizadas e individualizadas, possibilitando a geração de mapas temáticos e, assim, ter a configuração da disposição dos corpos hídricos superficiais da área mapeada. Para isto, complementarmente, empregou-se a extensão *ArcHydro* 10.5 para extração automática dos corpos hídricos superficiais e inclinação das vertentes, com correções manuais em casos de inconsistência, empregando as imagens *Landsat 8* ETM+, com composição R6G5B4, com fusão com a banda pancromática 8, resultando numa resolução de 15 metros.

A análise das bacias de drenagem que contém as áreas de disposição de resíduos sólidos foi realizada considerando suas localizações e corpos hídricos no entorno destas. Os modelos digitais de elevação foram utilizados para a extração das características físicas das bacias e calcular os parâmetros morfométricos relativos à geometria da bacia e à rede de drenagem apresentados na seção 1.4.

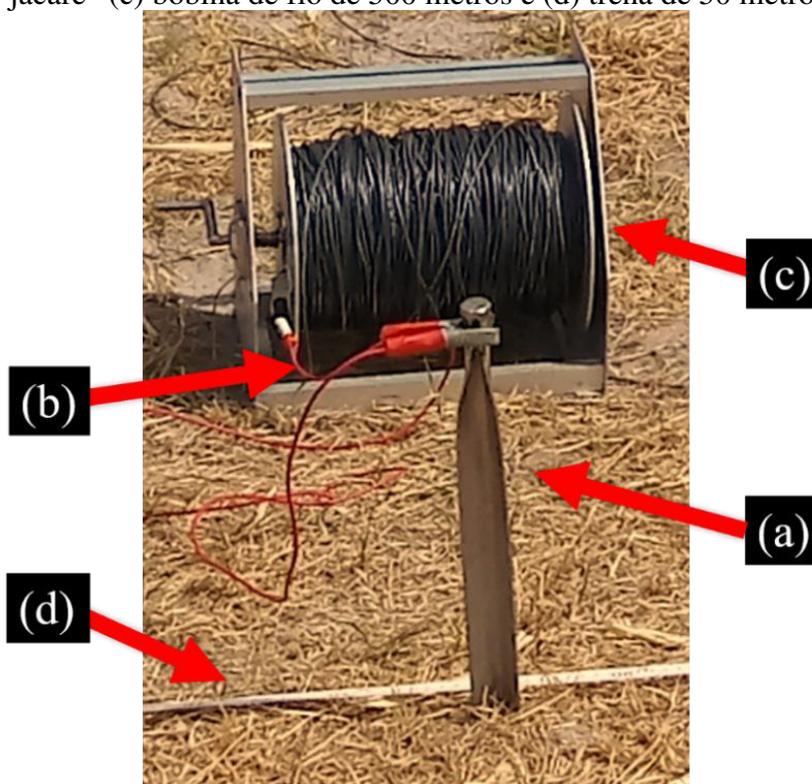
Posteriormente, os parâmetros morfométricos foram empregados para compor mapas de declividade (que apresentam a inclinação da bacia em vários pontos) e de hipsometria (que representa a altitude da bacia distribuída em várias curvas de nível). Esses mapas foram utilizados para a interpretação quanto a seus parâmetros morfométricos quanto para a descrição dos padrões de drenagem e suas relações com o meio geomorfológico e geológico, assim como realizado por Souza e Rossetti (2011), Cruz et al. (2017), Lacerda, Fonseca e Faria (2018), Lorandi, Santos e Lollo (2019) e Silva et al. (2020).

3.2.2 Levantamento Eletorresistivo (ER)

A caracterização do meio físico ocorreu *in loco*, com registros fotográficos das degradações encontradas e suas consequências. Para a investigação em subsuperfície, fora utilizado método geofísico através do levantamento eletorresistivo (ER) através da técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) com arranjo *Schlumberger*, descrita na seção 1.3. A quantidade de SEV mínimas foi definida conforme a equação (15), sendo que cada SEV foi devidamente georreferenciada.

A aplicação de diferença de potencial é realizada por meio de eletrodos, que são peças feitas de aço inoxidável e fincadas sobre a superfície do terreno (Figura 20a), os eletrodos são conectados a cabos elétricos com agarras (Figura 20b), estes enrolados em quatro bobinas, duas destas contendo fios elétricos com comprimento de 100 metros cada e as outras duas com 500 metros de fios cada (Figura 20c). Para o correto posicionamento e espaçamento dos eletrodos, foram empregadas duas trenas de 50 metros (Figura 20d).

Figura 20 – Elementos do ER: (a) eletrodo de aço, (b) cabo elétrico com agarras do tipo “jacaré” (c) bobina de fio de 500 metros e (d) trena de 50 metros.



Fonte: Próprio autor (2019).

O equipamento utilizado para a coleta geofísica fora o Resistímetro GEOTESTE RD-300A (Figura 21), de fabricação brasileira, similar ao empregado por Souza et al. (2013),

Gomes et al. (2016), Silva et al. (2018), Souza, Andrade e Moraes (2018) e Souza e Carvalho (2017). O aparelho é alimentado por oito (8) pilhas AA e o circuito sustentado por duas baterias de 12V associadas em série, perfazendo uma diferença de potencial de 24V.

Figura 21 – Materiais para o ER: baterias de 12V associadas em série, que alimentam o resistivímetro GEOTESTE-300A (leitor de corrente e leitor de potencial).

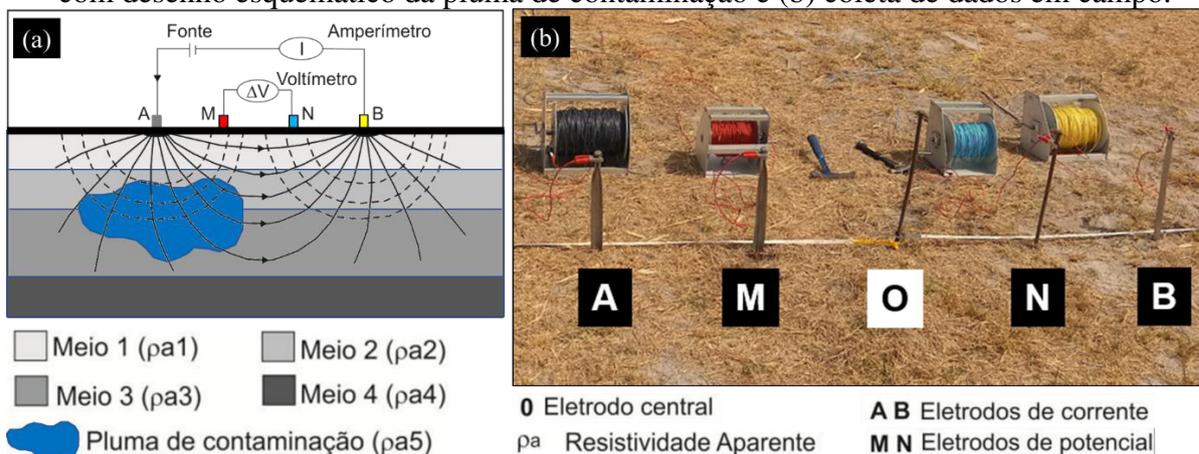


Fonte: Próprio autor (2019).

Outros materiais empregados na coleta foram: câmera fotográfica, GPS, solução salina (para aplicação nos eletrodos, com a finalidade de melhorar o desempenho do pulso elétrico transferido do eletrodo ao meio geológico), ficha de anotações, calculadora, marreta para cravação dos eletrodos, guarda-sol (para a proteção do equipamento dos raios solares).

Uma exemplificação de como é a coleta em campo de dados geofísicos é mostrada na figura 22, em que se associam as linhas de corrente, com o resistivímetro no arranjo *Schlumberger*. Os valores de resistividade medidos correspondem ao valor experimental a certa profundidade e, por isso, podem-se detectar anomalias resistivas, isto é, valores de resistividade significativamente menores do que os do meio litológico natural, conforme observados por Silva et al. (2018) e Souza, Andrade e Moraes (2018).

Figura 22 – Exemplificação da coleta de dados geofísicos: (a) SEV com arranjo *Schlumberger* com desenho esquemático da pluma de contaminação e (b) coleta de dados em campo.



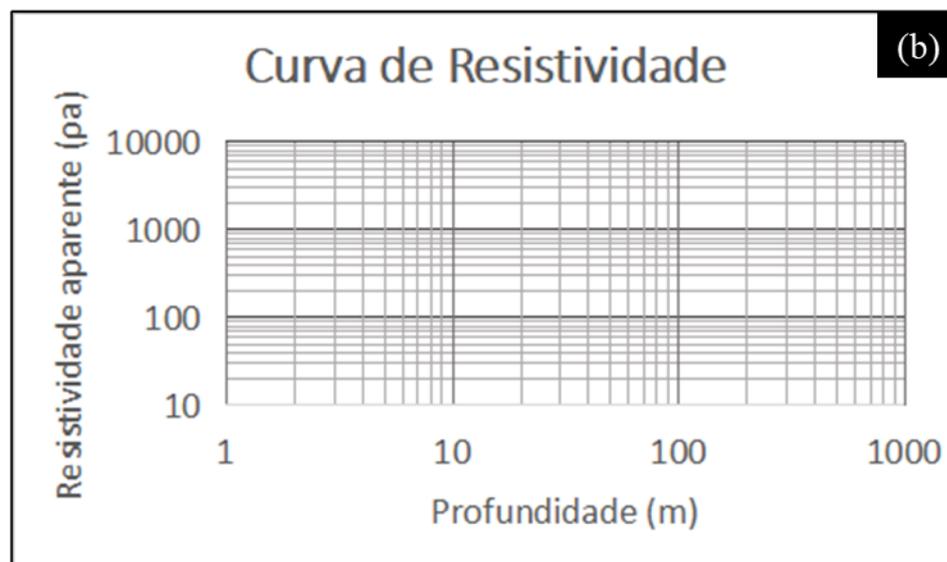
Os dados coletados das SEV foram registrados em tabela (Figura 23a), com a qual foram calculados os valores de resistividade aparente e permitiram a produção de uma curva de campo (Figura 23b), em que os resultados obtidos são dispostos em um gráfico bi-logarítmico, no qual são representados nos eixos das abscissas a distância em metros ($AB/2$), e no eixo das ordenadas, o valor das resistividades aparente (ρ_a) que empregam a equação (14), para que sejam interpretadas por meio da variação dos valores de resistividade aparente em função da profundidade.

Em campo, também foram avaliados os parâmetros pedológicos, assim como realizado por Gomes et al. (2016), Mepaiyeda et al. (2019), Souza e Carvalho (2017), para comparação com as SEV correspondentes, para avaliar a resistividade do terreno natural e associar os valores de resistividade aparente do meio geológico, visto que, solos arenosos, siltosos e argilosos apresentam variações de resistividade, constatados por diversos autores, e. g., Braga (2006; 2016), Gomes et al. (2016), Lopes et al. (2018), Silva et al. (2018), Souza, Andrade e Moraes (2018), e Souza e Carvalho (2017).

Os dados elétricos após coletados foram processados no aplicativo *IPI2Win* desenvolvido pela *GEOSCAN-M Ltda.*, que consiste num conjunto de ferramentas gratuitas, com o intuito de construir modelos em profundidade do comportamento da possível contaminação produzida pelos resíduos sólidos depositados na superfície do terreno. Duda et al. (2020), Lopes et al. (2018), Gomes et al. (2016), Silva et al. (2018) e Souza e Carvalho (2017) empregaram esta aplicação para a análise dos dados geofísicos e realizar o ajuste (inversão) das curvas de resistividade, para que haja distinção entre as camadas do meio geológico.

Figura 23 – Método de registro e apresentação de dados do levantamento eletrorresistivo: (a) Ficha de campo da SEV e (b) Gráfico em escala bi-logarítmica.

SEV										(a)	
AB/2 (m)	MN (m)					ΔV (mV)	I (mA)	ρ_i (Ωm)	ΔV (mV)		I (mA)
	0,5	2	5	20	50						
1	5,89					126,1	1,6				
1,3	10,22					186	4,4				
1,8	19,96					165,3	6,7				
2,4	35,8					227	14,1				
3,2	63,95					172	16,6				
4,2	110,4					72,4	11,5				
5,5	189,7	45,95				45,7	11,6	47,5	16		
7,5	353	86,79				57,5	28,9	218	28,9		
10	627,9	155,5				44,5	41,7	161	41		
13	1061,4	263,9				16,2	31,4	63,8	30,8		
18	2035,4	507,4				11,7	56,8	43,8	56,6		
24	3618,7	903,2				4,5	38,2	16,4	37,7		
32		1606,9	639,5			14,6	61,1	37	60,8		
42		2769,3	1104,4			5,9	40,9	14,7	40,2		
55		4750,1	1896,7			3,1	37,8	7,4	37		
75			3530,4	867,9		3,4	42,2	16,5	42,1		
100			6279,3	1555,1		1,8	57,6	8,9	57,3		
130			10615	2638,9		2,5	195	10,9	198		
180				5073,7	1996,5	4,3	281	9,8	286		
240				9032,1	3579,8	1,9	343	4,5	340		
320					6394,7	3138,4	1,6	139,9	1,4	139,6	



Fonte: Próprio autor (2020).

O processo de inversão foi realizado com incremento gradual de camadas, iniciando com duas camadas e, a partir destas ajustar a curva de modo a minimizar o erro (em %). Se o erro persistir muito significativo (superior a 10%), aumenta-se uma camada, i. e., o processo é interrompido a partir do momento em que o erro fica abaixo de 10%, e a fim de minimizar erros de interpretação, empregou-se o processo de inversão apenas em pontos com pouca ou baixa interferência de contaminação (configurando-se, assim, como representativos da geologia local), seguindo procedimentos similares ao realizados por Moreira et al. (2013).

Após os processamentos das curvas de resistividade, os dados foram utilizados para a composição das assinaturas geofísicas em subsuperfície por meio de isópacas (ou isolinhas), com o auxílio da aplicação *IPI2WIN* e a ferramenta *ArcScene*, do pacote do *ArcGIS*. Estas permitem representar o comportamento geoeletrico assim como as seções apresentadas por Bichet, Grisey e Aleya (2016) e Gomes et al. (2016) e modelos que representam variação lateral de resistividade como os apresentados por Souza e Carvalho (2017) e Souza, Andrade e Moraes (2018).

Os modelos supracitados dispõem os valores de resistividade em suas devidas localizações georreferenciadas, e permitem distinguir camadas litológicas e visualizar a geometria da possível pluma de contaminação em subsuperfície. É possível indicar a existência de plumas de contaminação por comparar as curvas de resistividade coletadas no entorno das áreas de disposição de resíduos sólidos com as SEV realizadas nas regiões possivelmente contaminadas, distinguindo-se o meio geológico em profundidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados e as discussões obtidos a partir da caracterização morfométrica e da modelagem geofísica, sendo a coleta de dados executada em três áreas de disposição de resíduos sólidos localizados em municípios na porção norte do estado de Roraima.

Cada área de estudo é apresentada separadamente (municípios de Alto Alegre, Cantá e Normandia, respectivamente, em forma de subseções), iniciando-se com uma descrição holística de como é realizada a disposição de resíduos sólidos gerados e sua classificação conforme as Normas Brasileiras Regulamentadoras – NBR 8419 e 15849 (ABNT, 1992; 2010), sendo a descrição baseada em registros fotográficos, relatos informais (e g., moradores e/ou trabalhadores das áreas de alocação de resíduos sólidos) e em comunicação com as administrações locais.

Posteriormente, há a caracterização dos padrões de drenagem no entorno de cada área, bem como a delimitação da bacia de drenagem do corpo hídrico no qual cada área de estudo está inserida e seus parâmetros morfométricos. Em seguida, apresentam-se os resultados do ER interpretado a partir dos aspectos geológicos, pedológicos e geomorfológicos das áreas estudadas.

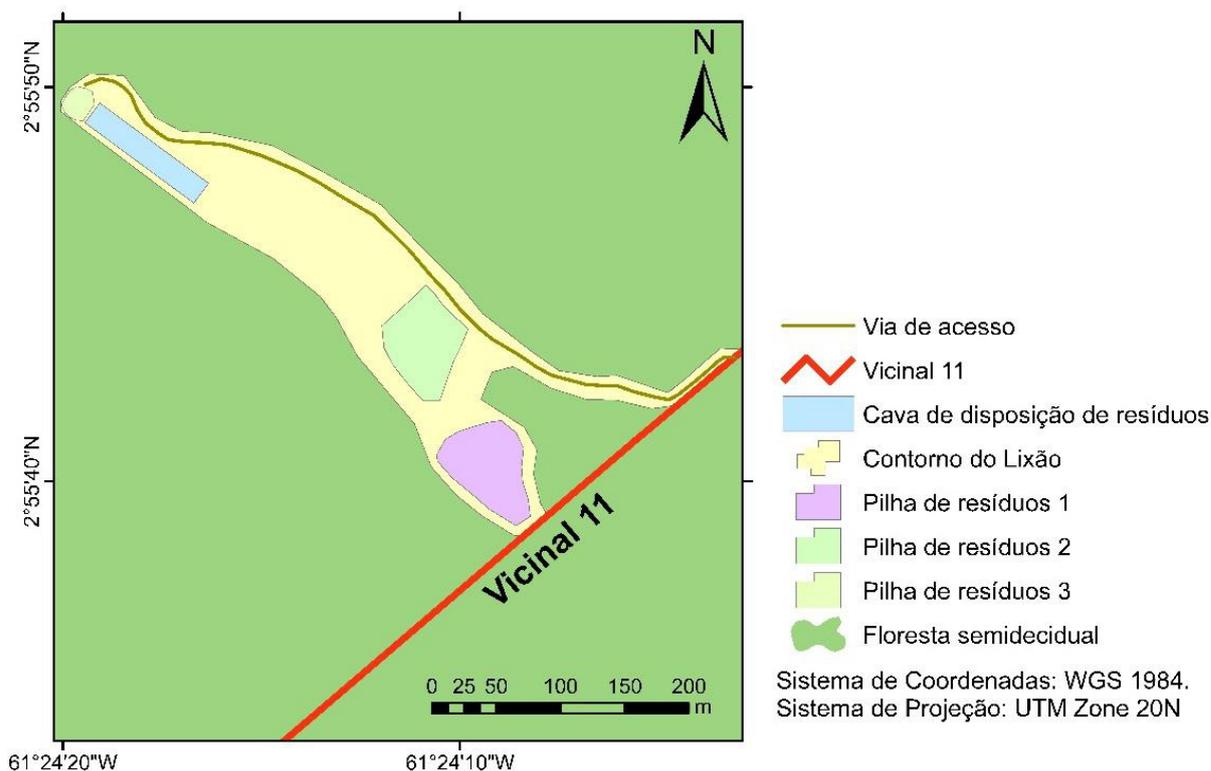
A seção finaliza-se com uma discussão geral a respeito da modelagem hipotética da pluma de contaminação, advinda da assinatura geofísica em subsuperfície de cada área estudada, e inferir a forma como o chorume pode interagir com o meio geológico, os corpos hídricos superficiais e águas subterrâneas.

4.1 DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE ALTO ALEGRE

O município do Alto Alegre conta com área de disposição de resíduos sólidos de cerca de 40.000 m² (Figura 24) de formato poligonal não definido (sugerindo que não há um planejamento de composição) inserida em um terreno de 100.000 m² (200 m x 500 m), localizada a 15 quilômetros da sede do município e acessado pela Vicinal 11. A disposição diária é de aproximadamente 15 m³ de resíduos sólidos, considerando a capacidade do caminhão da Prefeitura do Município, que faz uma viagem diária. A área está em operação há 18 anos e possui em sua vizinhança propriedades rurais, com plantações e criação de animais para abate.

As atividades de campo foram realizadas em 2 de agosto de 2019 para a localização e averiguação do local na estação chuvosa, e nos dias 4 e 5 de outubro de 2019 para a coleta de dados geofísicos (ER, com prospecção de cinco sondagens elétricas verticais – SEV), bem como a verificação das características no período seco.

Figura 24 – Desenho esquemático da área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre/RR.



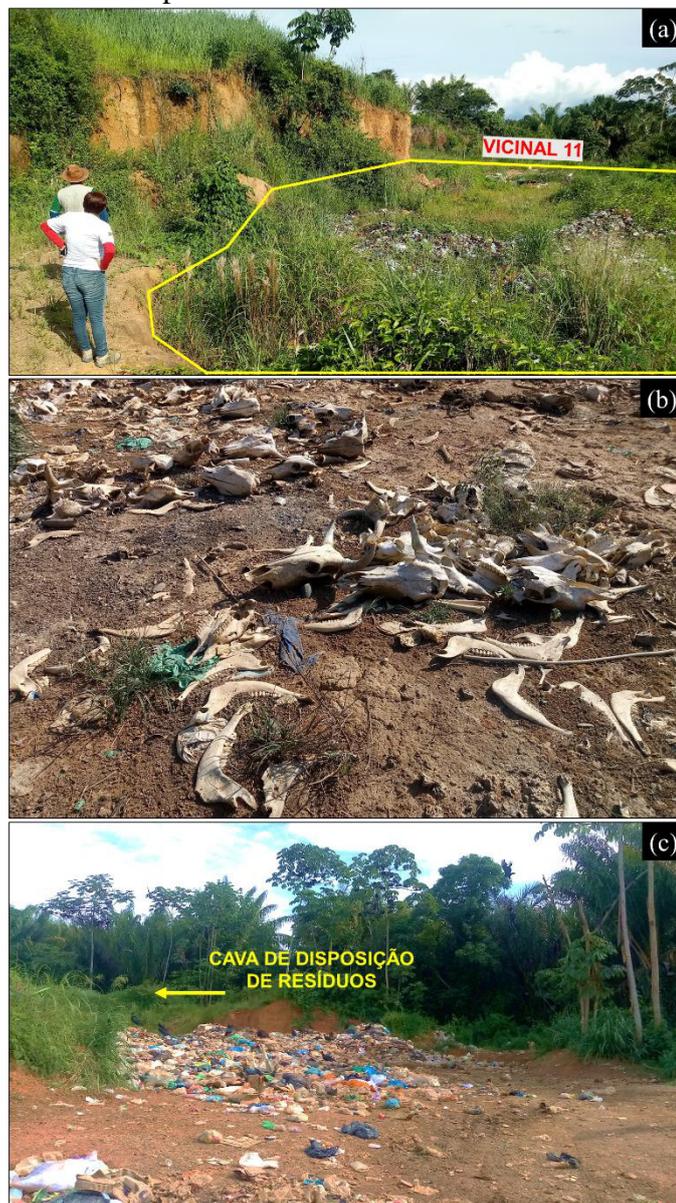
Fonte: Próprio autor (2020).

A área possui três locais de empilhamento de resíduos. A pilha de resíduos 1 (Figura 24) fica próxima à Vicinal 11, apresenta acúmulo de resíduos domésticos, eletrodomésticos, em baixo volume, mas sem qualquer tipo de tratamento, ou cobertura (Figura 25a). Parte considerável dos resíduos está recoberto pela vegetação, visto que esta porção não perfaz a rota de acesso do caminhão de coleta, e o terreno ser acidentado na entrada, é possível que esses resíduos tenham sido dispostos por moradores, e não pela administração da prefeitura.

A segunda pilha (Figura 24) fica na zona intermediária e possui, basicamente, resíduos orgânicos, cadáveres de animais (Figura 25b), que podem ter sido dispostos por moradores próximos, pois o caminhão de coleta não dispõe resíduos nessa área, não havendo controle de entrada e saída de veículos. Nesta parte, o terreno é fortemente irregular, com declive na direção NE-SW, impossibilitando, assim, a realização de uma sondagem elétrica vertical.

A terceira pilha (Figura 24) é a principal, onde os resíduos coletados pela prefeitura são acomodados diariamente (Figura 25c), dista cerca de 600 metros da entrada e possui uma cava para a disposição em sua lateral. Possivelmente, os resíduos são alocados temporariamente nessa pilha e, ocasionalmente, um equipamento (e.g. trator, retroescavadeira) realiza a acomodação dos resíduos na cava, visto que, a pilha demonstrava espalhamento de resíduos sólidos em direção a cava.

Figura 25 – Área de disposição e empilhamento de resíduos sólidos no município de Alto Alegre/RR. (a) Pilha 1 posicionada próxima a Vicinal 11, o polígono amarelo representa parte do amontoado de resíduos da pilha coberto por vegetação. (b) Pilha 2 localizada na zona intermediária, com presença de carcaças de animais dispostas, principalmente, bovina. (c) Exemplificação de parte dos resíduos da pilha 3, com predominância de resíduos domésticos, este é posteriormente acomodado na cava.



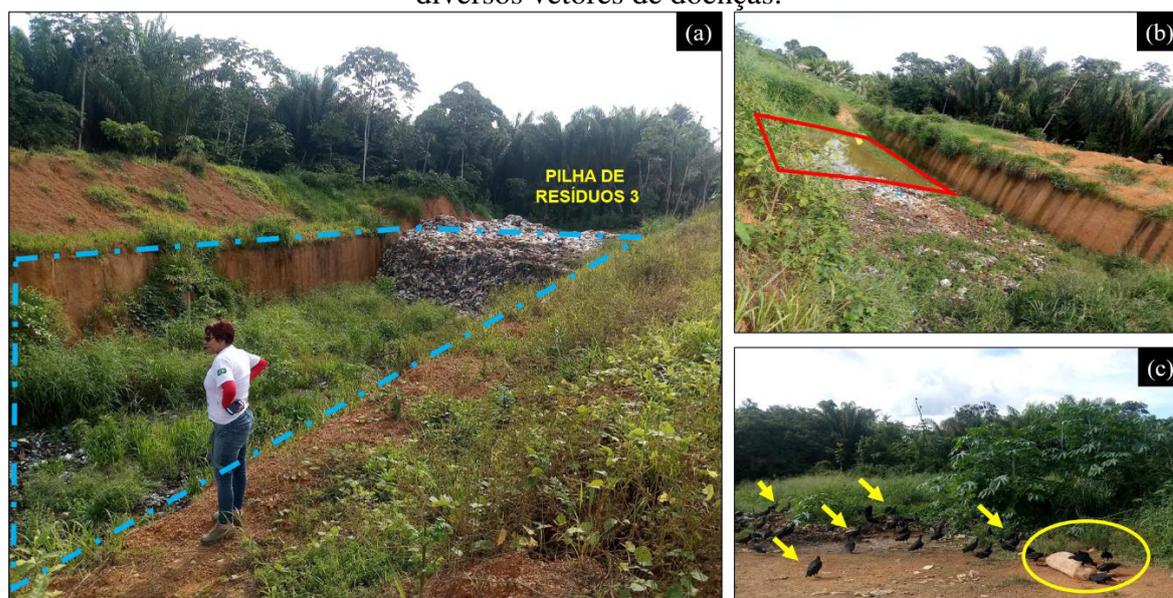
Fonte: Próprio autor (2019).

A cava de disposição possui medidas aproximadas de 105 metros de comprimento, 20 de largura por 3,5 metros de profundidade. Esta não possui sistema de impermeabilização, nem drenagem para o lixiviado e gases. Como não se constatou a presença de máquinas retroescavadeiras, nem de material de aterro, e que os resíduos estão a céu aberto, infere-se que não há cobertura diária dos resíduos com material argiloso, o que descaracteriza a área como aterro controlado (ABNT, 1992; 2010).

Os taludes têm inclinação de 90° com o fundo e o material de escavação foi colocado na encosta da cavidade podendo representar risco de desmoronamento, conforme se observa na figura 26a e 26b. Também há a presença de água empoçada no fundo da cava, propiciando a geração de lixiviado (chorume), mostrada na figura 26b, registrada no período seco, i.e., sugerindo proximidade do fundo da cava com o nível freático, visto que o solo é arenoso.

No que diz respeito aos resíduos dispostos, observou-se a predominância de resíduos domiciliares e animais em decomposição a céu aberto (Figura 26c). Vale ressaltar a forte presença de moscas e urubus, que podem ser vetores de doenças e impactar as propriedades rurais vizinhas, conforme Manzano et al. (2019).

Figura 26 – Áreas de disposição e empilhamento de resíduos no município de Alto Alegre/RR. (a) Cava de disposição dos resíduos dispostos na pilha de resíduos 3 (polígono azul tracejado). (b) O polígono vermelho representa o acúmulo de água no fundo da cava. (c) Presença de urubus (setas amarelas) e animais mortos (círculo amarelo), atraindo diversos vetores de doenças.



Fonte: Próprio autor (2019).

A partir das características levantadas por meio das visitas em campo, registros fotográficos e relatos informais, constata-se que a área de disposição de resíduos configura-se

como lixão a céu aberto, conforme classificado pela NBR 8419 e 15849 (ABNT, 1992; 2010), pois não contempla impermeabilização da cava de disposição, não há cobertura do material diariamente, nem drenagem e tratamento de lixiviado e gases produzidos, representando, assim, uma fonte de contaminação potencial do solo, rocha e das águas subterrâneas, além do risco de propagação de doenças e prejuízos às propriedades rurais na vizinhança.

4.1.1 Caracterização morfométrica

O lixão do município de Alto Alegre está localizado próximo ao igarapé Comissão, que deságua no rio Mucajá e este desagua no rio Branco. A rede de drenagem na área no entorno do local de disposição de resíduos sólidos é apresentada na figura 27. Dois padrões de drenagem foram observados, primeiramente o dendrítico, que se concentra nas porções oeste, sul e leste da área, predominando na porção sudeste, em que há a transição de uma região cristalina (Suíte Metamórfica Rio Urubu) para sedimentar (Formação Boa Vista). O padrão paralelo é presente nas porções central, norte e nordeste, sendo que no entorno do lixão, os canais são mais retilíneos, e apresentam-se com configuração paralela.

Nota-se que há uma brusca variação de padrão de drenagem na porção oeste da área, o que sugere a presença de anomalias de drenagem, sendo isso confirmado ao se observar mudanças de cursos d'água em 90° próximo às zonas de mudança de padrão, especialmente na porção noroeste (Figura 27). Na porção leste, há presença de meandros comprimidos. Christofolletti (1980) e Souza e Rossetti (2011) associam a presença de anomalias de drenagem com forte controle tectônico.

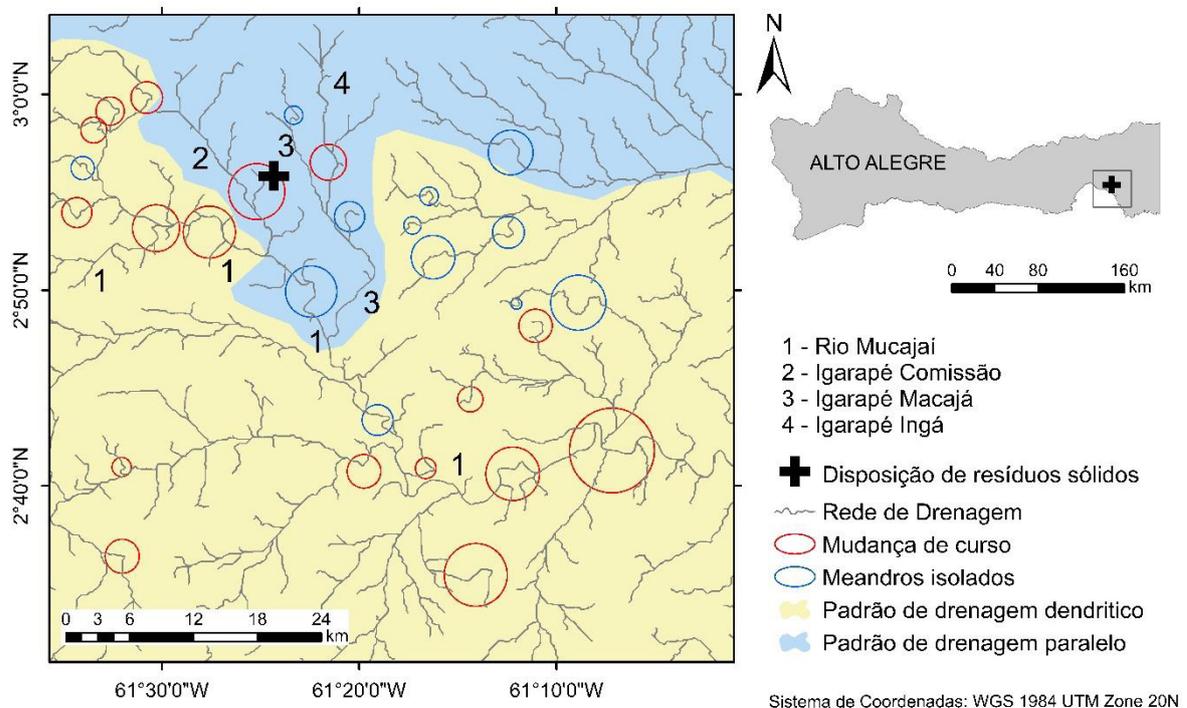
Nas zonas mais próximas a área de disposição de resíduos, percebe-se uma concentração de anomalias na porção NW (Figura 27), especialmente de mudanças de curso, variando de NW-SE para NE-SW, e isto ocorre nos três canais paralelos no entorno da área (igarapés Macajá e Comissão, e Rio Mucajá), o que sugere uma movimentação tectônica em comum, que pode ter iniciado um processo de compressão, que resultou na reconfiguração destes corpos hídricos, alterando sua direção de fluxo. A reconfiguração de corpos hídricos pode favorecer zonas de fraturamentos (CHRISTOFOLETTI, 1980) e, conseqüentemente uma zona favorável a aquíferos fraturados, característicos da região (CPRM, 2016a).

Os reflexos acima observados em superfície, ao serem associados com a subsuperfície, sugerem que as movimentações tectônicas, além de alterar as configurações de drenagem superficiais, interferem, também, nas configurações subterrâneas, ou seja, a mudança da direção

de um curso d'água influencia, diretamente também na configuração das águas subterrâneas, e como a área considerada apresenta aquíferos fraturados (CPRM, 2016a, b), pode-se inferir a direção do fluxo subterrâneo, dependendo de como é a configuração dos canais em superfície.

Portanto, quando se considera as compressões dos meandros e da mudança abrupta de drenagem na região próxima à região da alocação de resíduos, sugere-se a incidência de fraturamentos em subsuperfície, o que favorece a formação de caminhos preferenciais para o fluxo subterrâneo e, nos casos considerados, a hipótese é de que o fluxo preferencial se configura no sentido NE-SW, ainda que o fluxo superficial seja NW-SE.

Figura 27 – Padrões de drenagem do entorno da área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre/RR.



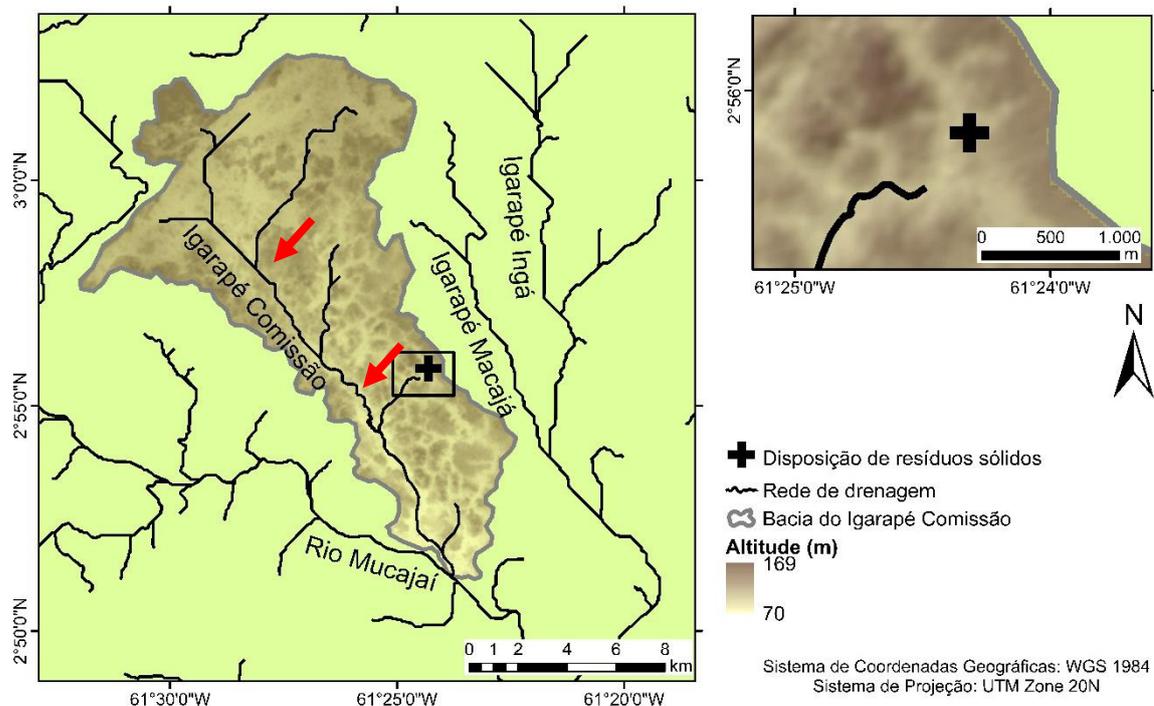
Fonte: Próprio autor (2020).

Para reforçar as afirmações anteriormente citadas no que diz respeito ao controle tectônico, torna-se necessário realizar o cálculo de parâmetros morfométricos das bacias de drenagem. Como o foco desta seção do estudo é no entorno do lixão do Alto Alegre, delimita-se a bacia de drenagem que contém a referida área.

A figura 28 mostrada a seguir apresenta a delimitação da bacia, em que os pontos de topografia mais alta estão indicados com colorações mais escuras, que possui área de 151,93 km² e perímetro de 79,22 km e fator de assimetria de 29,37, com basculamento à esquerda (a seta na figura 28 indica o sentido do basculamento da bacia do igarapé Comissão), confirmando

o controle tectônico. Ressaltando que a bacia possui padrão de drenagem predominantemente paralelo, visto que há retilinearidade dos canais e paralelismo entre eles.

Figura 28 – Delimitação da bacia no entorno do lixão, município de Alto Alegre/RR. As setas indicam o basculamento da bacia.



Fonte: Próprio autor (2020).

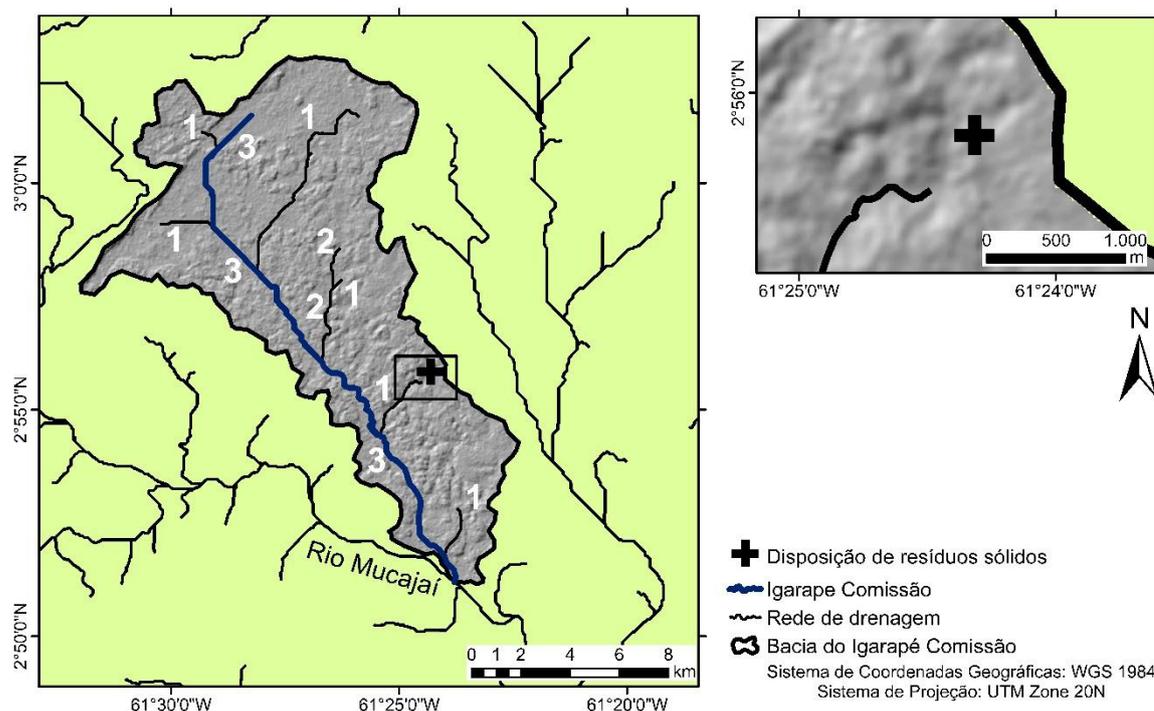
O curso d'água principal da bacia é o Igarapé Comissão, que nasce a partir de um lineamento estrutural (pelo relevo sombreado) na porção noroeste da figura 29, com direção NE-SW. O principal curso d'água intercepta a vicinal de acesso à área de disposição de resíduos do município, podendo isso implicar em um possível meio de veicular o fluxo contaminador advindo da área de disposição de resíduos sólidos.

O Igarapé Comissão possui 25,07 km de extensão e possui sinuosidade de 1,21, indicando que o canal é bastante retilíneo, como se observa na figura 29, que apresenta o relevo sombreado (gerado considerando um ângulo azimutal de 315° e zenital de 45°) da bacia e a classificação dos cursos d'água por *Horton*, sendo esta bacia de 3ª ordem, dessa maneira, nota-se que a partir da área de disposição, o escoamento passa por um canal de 1ª ordem, e flui para um canal de 3ª ordem, até chegar no exutório, que é o rio Mucajaí (Figura 29). Além disso, vale ressaltar que a configuração retilínea de cursos d'água facilita o transporte de sedimentos em suspensão (CHRISTOFOLETTI, 1980), bem como, um fluxo contaminador.

A análise dos parâmetros morfométricos permitiu verificar que esta, em condições naturais, possui o coeficiente de compacidade de 1,80 e o fator de forma com valor baixo, de

0,28, e isto significa que a bacia possui baixa propensão a enchentes (SILVA et al., 2020). A bacia também apresenta baixa densidade de drenagem, 0,32 km/km², que pode indicar alta permeabilidade do solo. Desta forma, impossibilita ou dificulta o escoamento de fluidos, p. e., o chorume.

Figura 29 – Relevo sombreado da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR). Os valores numéricos indicam a ordem dos canais, de acordo com a classificação de Horton.

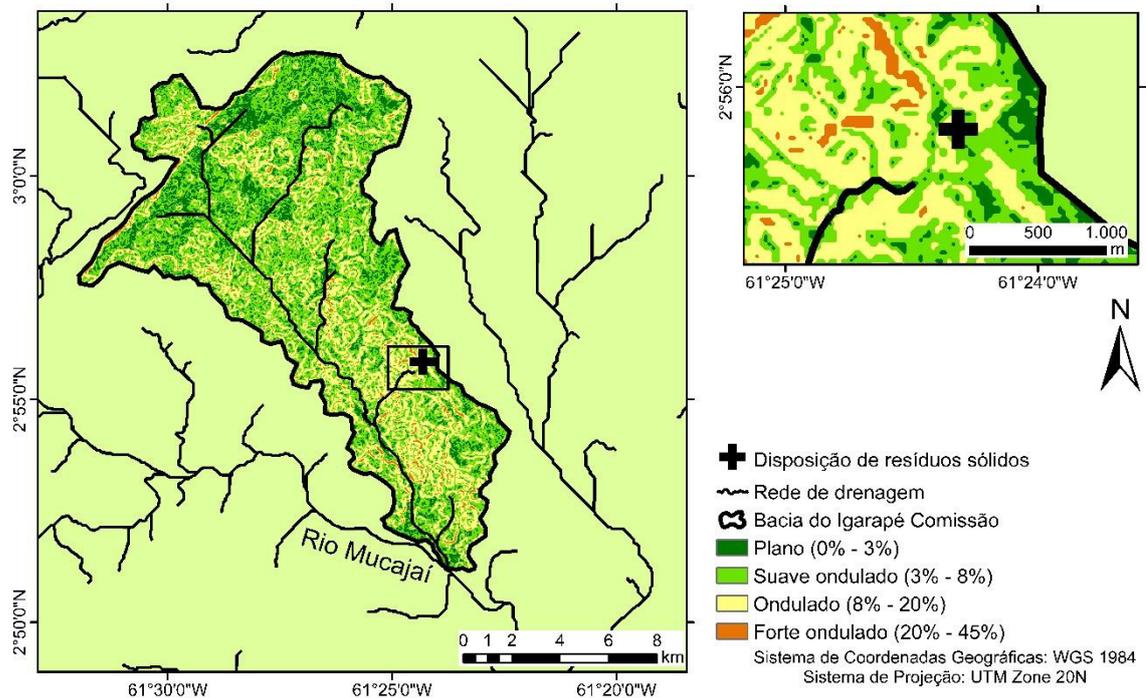


Fonte: Próprio autor (2020).

As vertentes da bacia são predominantemente planas (0% a 3%) a suave-onduladas (3% a 8%), perfazendo um total de 66,56% da área da bacia, sendo que as vertentes no entorno da área de disposição de resíduos apresentam classificações de onduladas (8% a 20%) a forte-onduladas (20% a 45%). Tal situação indica que há alta tendência a escoamento superficial no sentido NE-SW em relação ao corpo hídrico mais próximo, conforme se observa a figura 30.

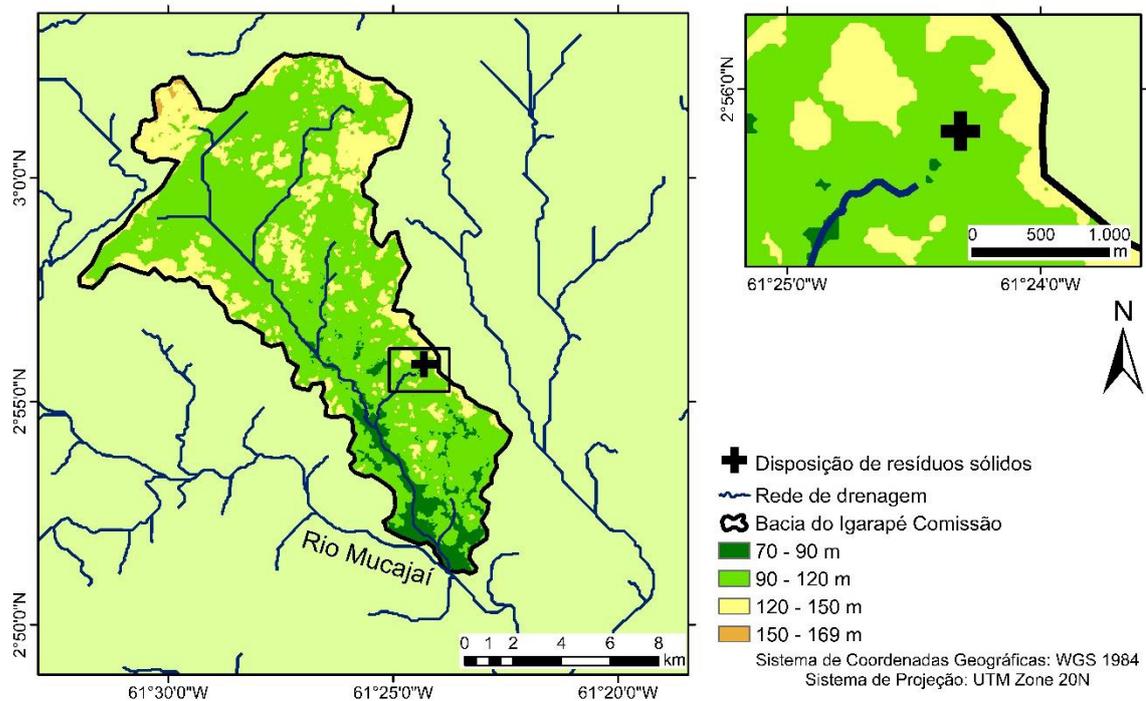
A bacia apresenta baixa amplitude altimétrica, conforme a figura 31, tendo o ponto mais baixo na altitude de 70 m e o ponto mais alto a 169 m, sendo que 79,74% da área se concentram entre as cotas de 90 a 120 m, o que indica maior tendência a dissecação, aspecto característico da região, que se caracteriza como um ambiente de colinas amplas e suaves, isso é favorecido pelo formato alongado da bacia (índice de circularidade de 0,30), que favorece o escoamento superficial, apresentando menor risco de enchente em condições normais de precipitação, conforme Villela e Mattos (1975).

Figura 30 – Mapa de declividade da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 31 – Mapa hipsométrico da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR).



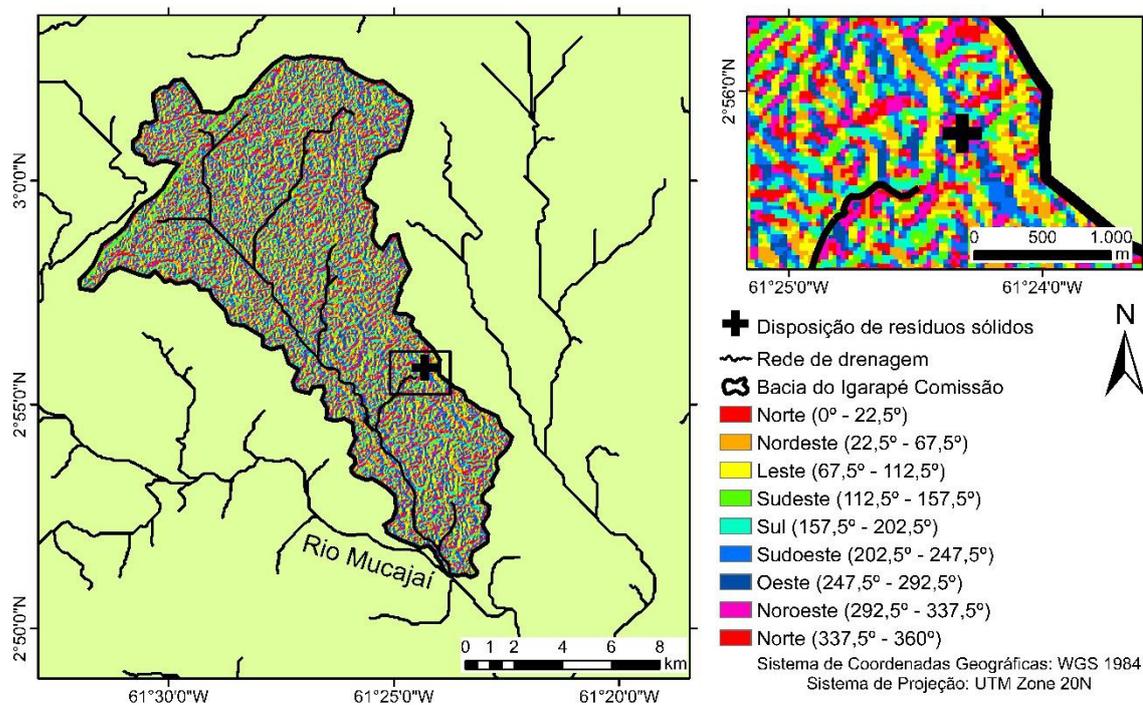
Fonte: Próprio autor (2020).

Outra característica avaliada da bacia foi a inclinação das vertentes (Figura 32), considerando-se oito classificações (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e

noroeste), em que se pode compreender o comportamento da superfície em função da incidência de radiação solar ao longo do dia e do ano (MOTTA et al., 2017).

O somatório das vertentes leste, nordeste, norte, oeste e noroeste contemplam 62,60% da área da bacia. O total das vertentes direcionadas ao sudeste, sul e sudoeste perfazem 37,40% da área da bacia, que são de menor incidência de radiação solar. Portanto, a bacia tem menor tendência de evapotranspiração do que conservação de umidade. No entanto, ao analisar a área no entorno da área de disposição de resíduos, nota-se a predominância de vertentes na direção sul e sudoeste, o que sugere que o fluxo preferencial é nessas direções e que o processo predominante é o de absorção, ou seja, conservação de umidade.

Figura 32 – Orientação das vertentes da bacia do igarapé Comissão (Alto Alegre, RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

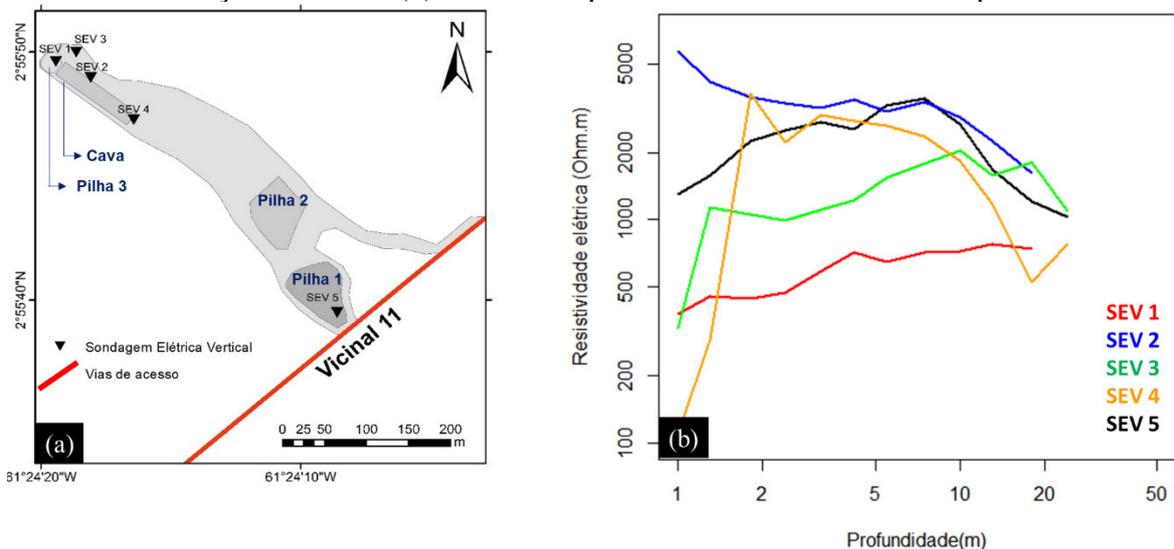
A consideração dos padrões de drenagem e parâmetros morfométricos permitiram verificar que a bacia do igarapé Comissão caracteriza-se por processos de dissecação e que é predominantemente plana, com baixa tendência de formação de novos canais (baixa densidade de drenagem), e conservação de umidade nos horizontes iniciais do solo, perfazendo um cenário que favorece a infiltração de água e acúmulo nos aquíferos fissurais descontínuos, em que, devido à baixa produtividade, podem apresentar alta concentração de contaminantes no entorno da área de alocação irregular dos resíduos sólidos.

4.1.2 Assinatura geofísica

As ponderações acerca das cinco sondagens elétricas verticais (SEV) coletadas na área de disposição de resíduos sólidos do município do Alto Alegre puderam ser interpretadas em associação ao meio geológico pertinente a área, que apresenta rochas cristalinas do tipo gnaisses (REIS; FRAGA, 1998).

A figura 33 mostra o posicionamento das SEV, bem como as curvas de resistividade aparente obtidas em campo. Os dados obtidos em campo das cinco SEV estão presentes, respectivamente, nos Apêndices A, B, C, D e E.

Figura 33 – Levantamento eletrorresistivo no lixão do município do Alto Alegre/RR. (a) Localização das SEV. (b) Gráfico de profundidade x resistividade aparente.



Fonte: Próprio autor (2020).

O perfil apresentado na figura 34 permite associar o meio pedológico com o dado geofísico, desta forma, implicar o componente físico (resistividade elétrica) ao conteúdo litológico do solo. Utilizando também a análise tátil e textural, esse tipo de solo apresentou coloração que se aproxima do vermelho-amarelo, com textura arenosa e, possivelmente, sua fração argila é de baixa atividade (o teor é mais siltoso do que argiloso), conservando essas características em profundidade.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SiBCS (SANTOS et al., 2018) tem-se para a área um solo predominantemente do tipo argissolo vermelho-amarelo com argila de baixa atividade, sendo isso, corroborado para a área em questão. Em profundidade, nota-se que o diâmetro das concreções lateríticas e de seixos de quartzo variam de tamanho,

sendo da ordem de 80 mm nos horizontes iniciais (Figura 34b) e estas vão diminuindo e se tornando mais dispersas (Figura 34c).

Figura 34 – Cava de disposição de resíduos sólidos no município de Alto Alegre/RR: (a) Afloramento posicionado ao fundo da cava de resíduos. (b) Vista aproximada ressaltando a presença de minerais de quartzo (círculos amarelos). (c) Vista aproximada ressaltando a presença de concreções lateríticas (círculos azuis).

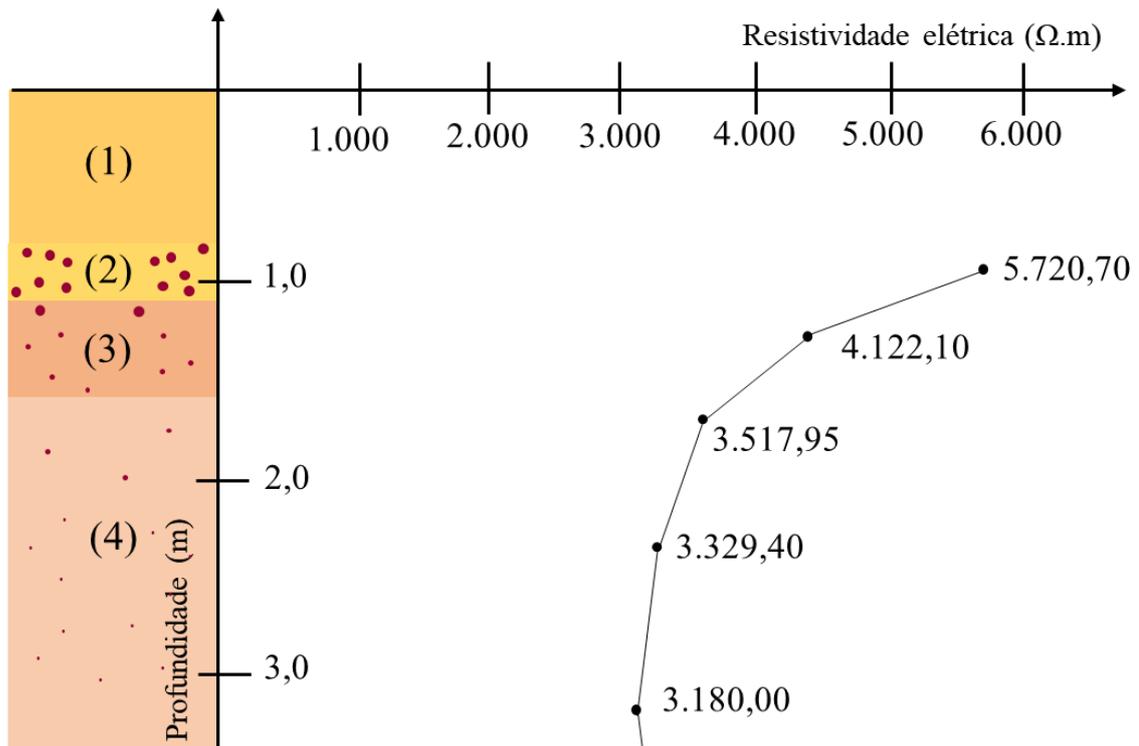


Fonte: Próprio autor (2019).

Na figura 35, tem-se a associação do perfil litológico com a SEV 2, sendo esta realizada acima do perfil (Figura 34) e, assim, selecionada para a realização do processo de inversão elétrica e interpretação, tendo em vista que as características do perfil podem ser comparadas e, além deste não ter influência dos resíduos sólidos, o que poderia provocar ruídos na interpretação do meio geológico.

Nota-se que os valores de resistividade elétrica apresentam um decréscimo acentuado e à medida que avança para as profundidades de 3,2 m este se estabiliza (Figura 35). Essa variação está diretamente associada à presença de minerais de quartzo e concreções lateríticas, que proporcionam o aumento da porosidade do horizonte e, conseqüentemente, aumenta a resistividade elétrica. À medida em que os diâmetros diminuem, a resistividade aparente se estabiliza, visto que há maior contato entre os grãos do meio geológico.

Figura 35 – Comparativo entre o perfil litológico (ver figura 34a) e a SEV 2 (ver figura 33a).



-  (1) horizonte arenoso com matéria orgânica e de coloração amarelo-acinzentada (argissolo amarelo distrófico).
-  (2) horizonte composto por areia fina, coloração amarelada esbranquiçada, estrutura maciça e presença de fragmentos de concreções lateríticas com diâmetro médio de 80 mm.
-  (3) horizonte constituído por areia fina com coloração alaranjada, estrutura maciça e concreções lateríticas em grande concentração e de dimensões milimétricas.
-  (4) horizonte variando de material siltoso e arenoso, coloração avermelhada, presença de concreções lateríticas dispersas e milimétricas.

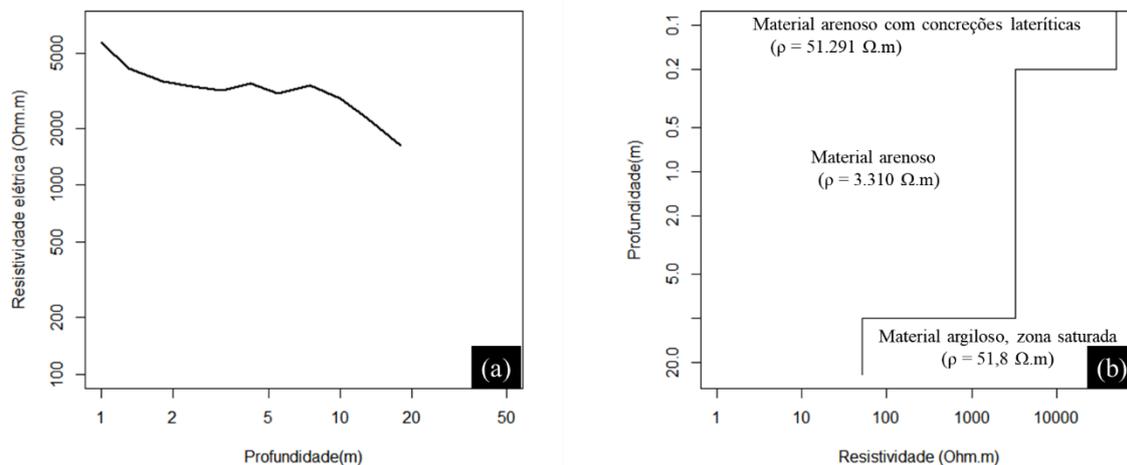
Fonte: Próprio autor (2020).

4.1.2.1 Padrão Geométrico 1 (SEV 2)

O padrão engloba apenas uma sondagem elétrica, SEV 2, esta realizada com profundidade de 18 metros (tipo Q, conforme o método comparativo de Braga (2006)), sendo localizada na margem norte da cava de disposição, em que não há interferência dos resíduos nas camadas superficiais, na porção noroeste da área de disposição (Figura 33a). A figura

abaixo apresenta a curva de resistividade e sua provável associação ao meio litológico pertinente, configurando assim, o perfil elétrico em profundidade.

Figura 36 – Configuração da Sondagem Elétrica Vertical 2 (SEV 2) (Alto Alegre/RR). (a) Curva de resistividade aparente. (b) Interpretação das camadas, por meio do processo de inversão, com o *IPI2WIN*.



Fonte: Próprio autor (2020).

O processo de inversão foi efetuado com minimização de erros com três camadas (erro de 3,93%, ver figura 36b). A primeira camada é predominantemente arenosa. Os valores de resistividade atingem 5.721 $\Omega.m$ na curva de campo e 51.291 $\Omega.m$ na interpretação do processo de inversão (discrepância que pode estar associada a alta porosidade da camada), corroborando o caráter arenoso das camadas superficiais, bem como a presença conglomerática (concreções lateríticas e minerais de quartzo, material pedregulhoso), que aumenta a porosidade da camada (BORTOLIN; FILHO, 2012; SOUZA; CARVALHO, 2017). O comportamento se repete na segunda camada, que mantém aspecto resistivo, variando entre e 3.034,8 a 4.124,4 $\Omega.m$ na curva de resistividade aparente e 3.310 $\Omega.m$ por meio da curva invertida até a profundidade de 9,94 m. É válido sugerir que valores na ordem de 50.000 $\Omega.m$ podem também ser associado a rochas cristalinas (BRAGA, 2016; KEAREY; BROOKS; HILL, 2009), visto que, a área do município de Alto Alegre apresenta rochas como o gnaiss e o diabásio (REIS; FRAGA, 1998).

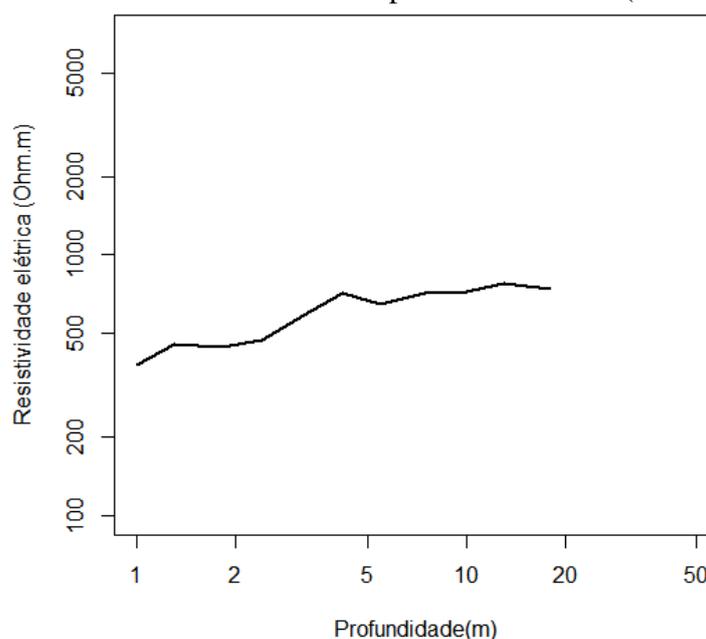
A terceira camada é distinguida a partir do ponto de inflexão supracitado (Figura 36b), tendo comportamento decrescente até a maior profundidade medida, tendo valores de resistividade aparente decrescente (2.860 a 1.621,4 $\Omega.m$) e, por meio do processo de inversão obteve-se valor de resistividade teórica de 51,8 $\Omega.m$ e configura-se como zona argilosa, que pode apresentar saturação, presença de lixiviado, bem como sua acumulação, justificando o decréscimo acentuado do valor de resistividade. Autores como Braga (2016) e Santos Filho et

al. (2017) apontam que esse ponto de decréscimo de resistividade aparente expressa aumento de saturação em profundidade, sugerindo a configuração de franja capilar, que, juntamente com um teor mais argiloso, podem funcionar como trapa natural para o chorume.

4.1.2.2 Padrão Geoelétrico 2 (SEV 1)

Assim como o padrão anterior este também perfaz apenas uma sondagem, SEV 1, com profundidade máxima de 18 metros (tipo A, conforme o método comparativo de Braga (2006)), estando localizada sobre a pilha de resíduos 3 (porção noroeste), onde há a alocação dos resíduos pelo caminhão, situando-se ao lado da cava de disposição (Figura 33a). A figura 37 apresenta a curva de resistividade aparente, configurando o perfil elétrico em profundidade.

Figura 37 – Curva de resistividade aparente da SEV 1 (Alto Alegre/RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

De maneira geral, a curva apresenta aspecto suavemente ascendente, algumas abruptas oscilações aos 1,8 m e aos 4,2 m de profundidade (Figura 37). A partir da profundidade de 1,0 a 2,4 m há suave aumento de resistividade, variando de 376,8 a 472,2 Ω .m, apresentando comportamento suavemente serrilhado e ascendente até os 5,5 m. O aumento de resistividade é verificado dos 5,5 m até os 13 m de profundidade, com valores oscilando de 647,3 até 971,1 Ω .m. De 13-18 m há estabilização dos valores de resistividade, sendo que a última leitura é de 742,9 Ω .m.

Como as camadas superficiais são arenosas e os valores de resistividade aparente estão muito abaixo dos obtidos na SEV2 (figura 36), infere-se que estas camadas estão sob ação do chorume, o que as torna menos resistivas, pois enquanto os valores dessa sondagem apresentaram uma variação média de 400 a 900 Ω .m os valores da SEV 2 oscilaram na ordem de 3.000-5.000 Ω .m nos horizontes superficiais, ou seja, a discrepância de valores chega a quase dez vezes. Os picos de resistividade manifestados na curva sugerem a presença de camadas com concreções lateríticas. Considerações similares a essas foram realizadas por Souza (2010), Souza e Andrade (2018), Souza e Carvalho (2017) e Souza, Andrade e Moraes (2018).

4.1.2.3 Padrão Geométrico 3 (SEV 3, 4 e 5)

Diferente dos padrões anteriores este englobou três sondagens elétricas. A SEV 3 foi realizada na via de acesso à pilha de resíduos 3 (porção noroeste), a SEV 4 na extremidade oposta da cava e a SEV 5 sobre a pilha de resíduos 1 (porção sudoeste, figura 33a). Todas as sondagens tiveram alcance máximo de 24 metros de profundidade (tipo K, conforme o método comparativo de Braga (2006)).

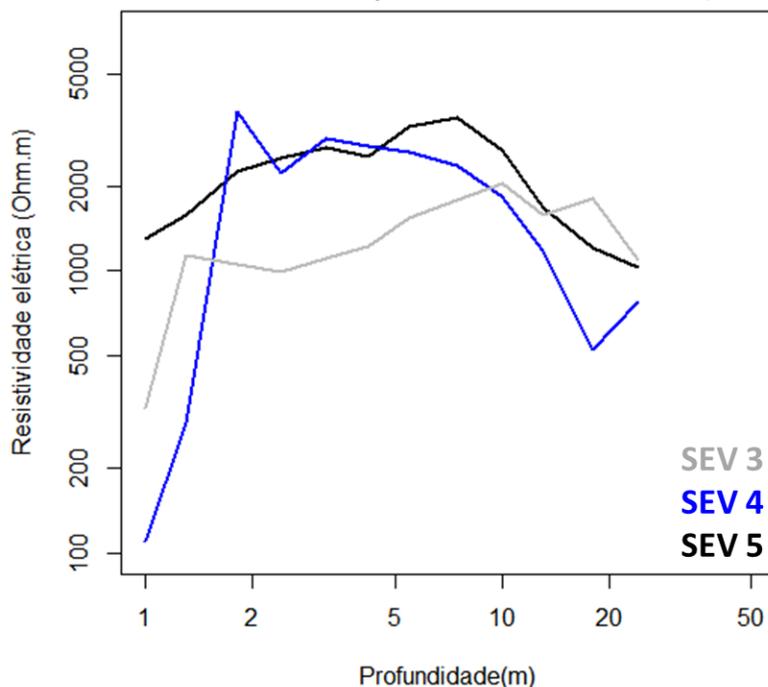
No geral as sondagens apresentaram aspectos fortemente similares, ou seja, possuem baixos valores de resistividade nas primeiras leituras, altos valores nas camadas intermediárias, e forte decréscimo a partir dos 10 metros de profundidade, além de mostrarem geometrias convexas (Figura 38).

As profundidades iniciais da SEV 3 apresentam aspecto abruptamente ascendente, variando de 324,6 a 1.131,6 Ω .m na profundidade de 1,3 m. A SEV 4 também se mostra com o mesmo padrão, variando de 110,3 a 3.352 Ω .m na profundidade de 1,8 m (Figura 38).

Posteriormente, na SEV3, nas zonas de 1,3-4,2 m de profundidade a curva apresenta suave convexidade, com os valores variando de 996,6 a 1219,7 Ω .m. Até a profundidade de 10 metros, a curva tem um comportamento ascendente, atingindo um pico de 2.459,4 Ω .m e, finalmente, aspecto decrescente com serrilhamentos até a profundidade de 24 metros, com valor de 1090,2 Ω .m (Figura 38).

A SEV 5 apresentou valores de resistividade mais altos em relação às SEV 3 e 4, mas também com aspecto ascendente, variando de 1.298,4 a 3.504,0 Ω .m na profundidade de 7,5 m, sendo este o ponto de inflexão da curva, e, a partir dessa profundidade, a curva tem aspecto decrescente, atingindo 1.031,4 Ω .m aos 24 m (Figura 38).

Figura 38 – Curva de resistividade aparente das SEV 3, 4 e 5 (Alto Alegre/RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

Os valores de resistividade das camadas iniciais variam da ordem de 100 $\Omega.m$ e atingem valores acima de 1.000 $\Omega.m$ em profundidade, o que sugere que nos pontos analisados com esse padrão geoeletrico há resquícios de materiais condutivos nas primeiras camadas, essa abrupta variação pode se caracterizar como uma anomalia condutiva, visto que, conforme considerado no Padrão Geoeletrico 1, os horizontes mais superficiais são arenosos, isto é, espera-se que nestes, encontre-se valores de resistividade maiores do que nas camadas mais profundas.

Nos horizontes intermediários, as SEV 3, 4 e 5 apresentam certa retilinearidade, com a SEV 3 tendo valores inferiores ($1.056,1 < \rho_a < 2.459,4 \Omega.m$) e nas SEV 4 e 5 valores superiores e bem próximos ($2.253,2 < \rho_a < 3.504,0 \Omega.m$). Essa retilinearidade se conserva de 1,8 a 10 m de profundidade (Figura 38).

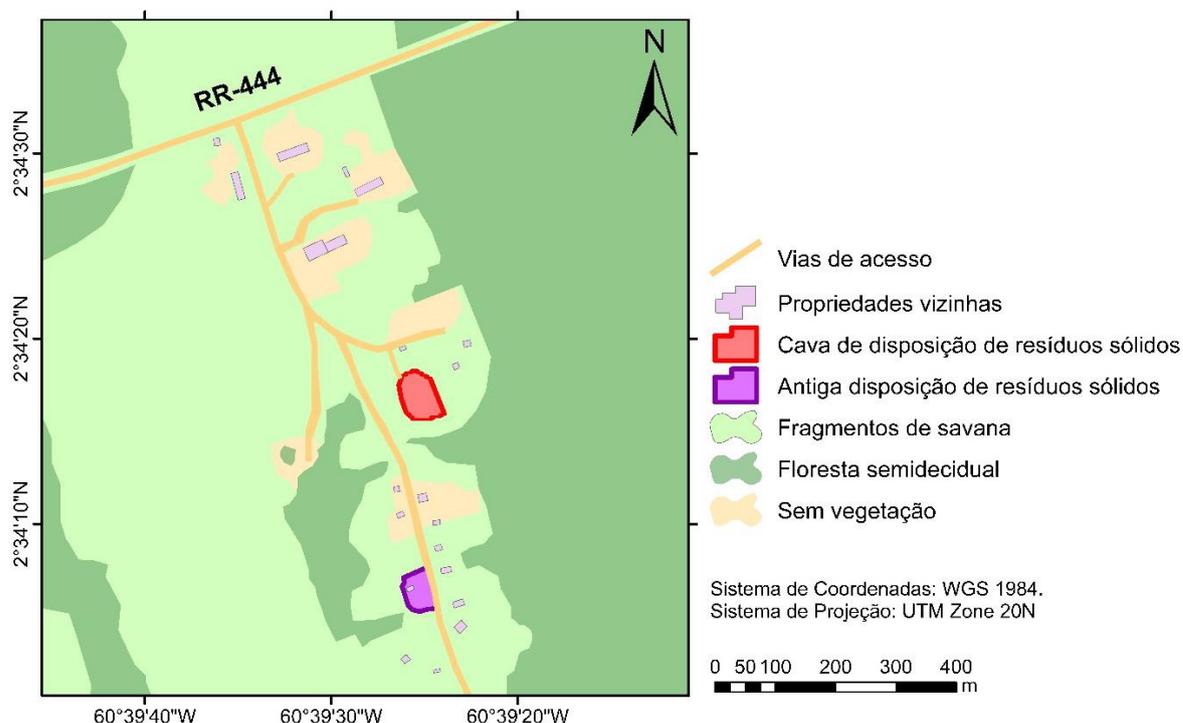
As três sondagens adquirem decréscimo abrupto a partir dos 10 m de profundidade, o que, de acordo com Braga (2016) indica a presença de franja capilar, ou seja, essas profundidades contêm materiais mais argilosos e, conseqüentemente, aumento de saturação. Como as camadas acima são arenosas, ou seja, mais porosas, e não há uma camada argilosa acima, qualquer lixiviado gerado em superfície pode migrar rapidamente pelos poros das camadas arenosas e serem retidos nas camadas argilosas, tornando essas camadas ainda mais condutivas.

4.2 DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE CANTÁ

A área de disposição de resíduos sólidos está em operação há 12 anos (figura 39), estando localizada a cerca de 7 km da sede do município, abrange terreno com aproximadamente 40.000 m².

Para o reconhecimento do local, foram realizadas visitas a campo no dia 26 de julho de 2019, estação chuvosa, e nos dias 1 e 29 de novembro de 2019 para a realização do levantamento geofísico (ER, com execução de cinco SEV). Destas três realizadas no entorno da cava principal, uma na via de acesso, para relação com o meio geológico, e uma em frente ao antigo “lixão” que operava na mesma área (Figura 39).

Figura 39 – Desenho esquemático da área de disposição de resíduos sólidos do município do Cantá/RR.



Fonte: Próprio autor (2020).

A área possui um local de alocação de resíduos sólidos, em que parte considerável destes está coberto por vegetação, a cava consiste numa poligonal irregular, com cerca de 3 m de profundidade e 3.295 m² de área superficial, com rampa de acesso à norte. Segundo relatos de moradores da vizinhança, o lugar funcionava como um ponto de extração de pedra-jacaré (concreções lateríticas, utilizadas para pavimentação de rodovias) e, com a desativação do antigo “lixão”, os resíduos sólidos passaram a ser dispostos na atual área.

Na cava da figura 40a, os resíduos coletados pela prefeitura são acomodados diariamente, estima-se que cerca de 15 m³ são dispostos diariamente de segunda-feira a sexta-feira pelo caminhão de coleta no final de cada dia. Como não há cobertura do material disposto, na estação chuvosa, o que é precipitado satura a pilha de resíduos, provocando a formação e exsudação de lixiviado, atraindo moscas, causando um odor nauseante, característico do chorume.

Figura 40 – Fotos da área de disposição de resíduos sólidos no município do Cantá/RR durante a estação chuvosa. (a) Vista a partir da rampa de acesso da cava de resíduos, com destaque ao acúmulo de chorume (polígono branco). (b) Entrada da cava de resíduos, com a presença de propriedades vizinhas no mesmo terreno (destaque em amarelo).

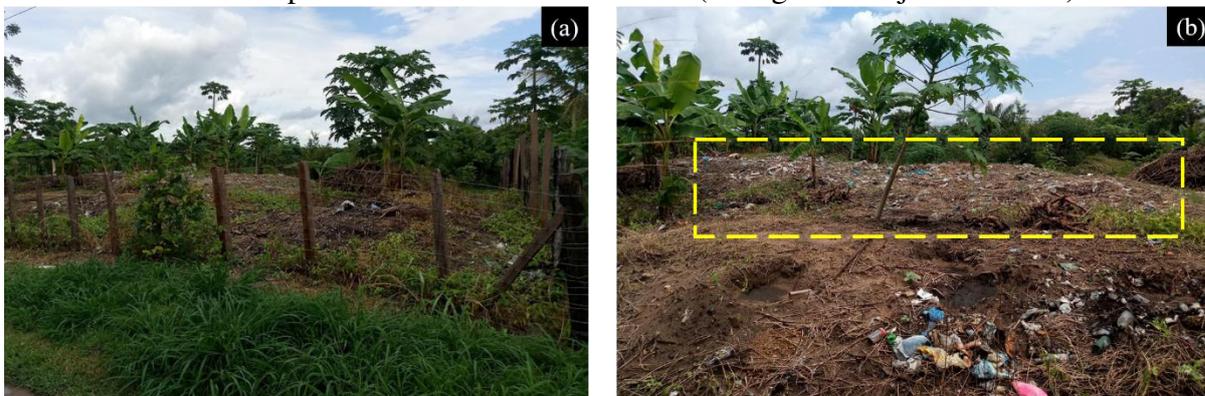


Fonte: Próprio autor (2019).

A cava de disposição não possui sistema de impermeabilização, nem drenagem para o lixiviado e gases, visto que, não há maquinário, nem material de cobertura para os resíduos sólidos dispostos no local, constata-se ainda que a área não se enquadre na classificação de aterro controlado, nem sanitário (ABNT, 1992), o que refuta as informações disponibilizadas pelo IBGE (2010), de que o município de Cantá conta com a disposição de resíduos sólidos por meio de aterro controlado.

No que diz respeito à composição dos resíduos dispostos na cava, observou-se a predominância de detritos domiciliares (Figura 40a), sendo a mesma característica notada no antigo “lixão”, que atualmente é uma propriedade particular (Figura 41). Vale ressaltar a forte presença de moscas e urubus, que podem ser vetores de doenças e impactar as propriedades vizinhas (Figura 40b) que; conforme apresentado no desenho esquemático da figura 39 e na foto da figura 40b; se situam muito próximas à cava, num raio inferior a 250 m, distância mínima prescrita pelas NBR 8419 e 15849 (ABNT, 1992; 2010).

Figura 41 – Fotos do antigo “lixão” do município do Cantá/RR. (a) Vista frontal da área. (b) Detalhe da pilha de resíduos remanescente (retângulo tracejado amarelo).



Fonte: Próprio autor (2019).

Na estação seca, constatou-se a prática de incineração dos resíduos dispostos na cava (Figura 42), sendo essa informação confirmada por moradores da vizinhança, que acrescentaram que no período seco costuma-se atear fogo em toda a área. Além disso, notou-se que os resíduos alocados no fim da rampa de acesso em cada dia de trabalho são, ocasionalmente, arrastados por uma máquina retroescavadeira para as porções mais ao centro desta, isso, inclusive, permitiu que uma sondagem elétrica vertical fosse realizada onde os resíduos são diariamente dispostos.

Figura 42 – Área de disposição de resíduos sólidos no município de Cantá/RR na estação seca. (a) e (b) Presença de fumaça que sugere a prática de incineração dos resíduos (destacados nos círculos brancos).



Fonte: Próprio autor (2019).

Por meio das informações coletadas e dos registros fotográficos, constata-se que a área se classifica também como lixão a céu aberto, assim como a do município do Alto Alegre, conforme as NBR 8.419, 13.896 e 15.849 (ABNT, 1992; 1997b; 2010) prescrevem. O motivo dessa afirmação se sustenta pela ausência de impermeabilização na cava, não há cobertura do material disposto diariamente, nem drenagem e tratamento de lixiviado e gases produzidos, além do procedimento de incineração de resíduos, que não tem amparo normativo para realização, vale destacar também que a cava fica a distância inferior a 250 metros de propriedades habitadas.

Além dos aspectos construtivos, deve-se destacar que a localização da área de alocação de resíduos também é um fator que inviabiliza sua instalação, ainda que fosse nos moldes de aterro sanitário, ou seja, a proximidade com a vizinhança é um aspecto preocupante, sem mencionar a presença de poços em propriedades rurais no entorno da cava, que é a forma de abastecimento de água do local.

4.2.1 Caracterização morfométrica

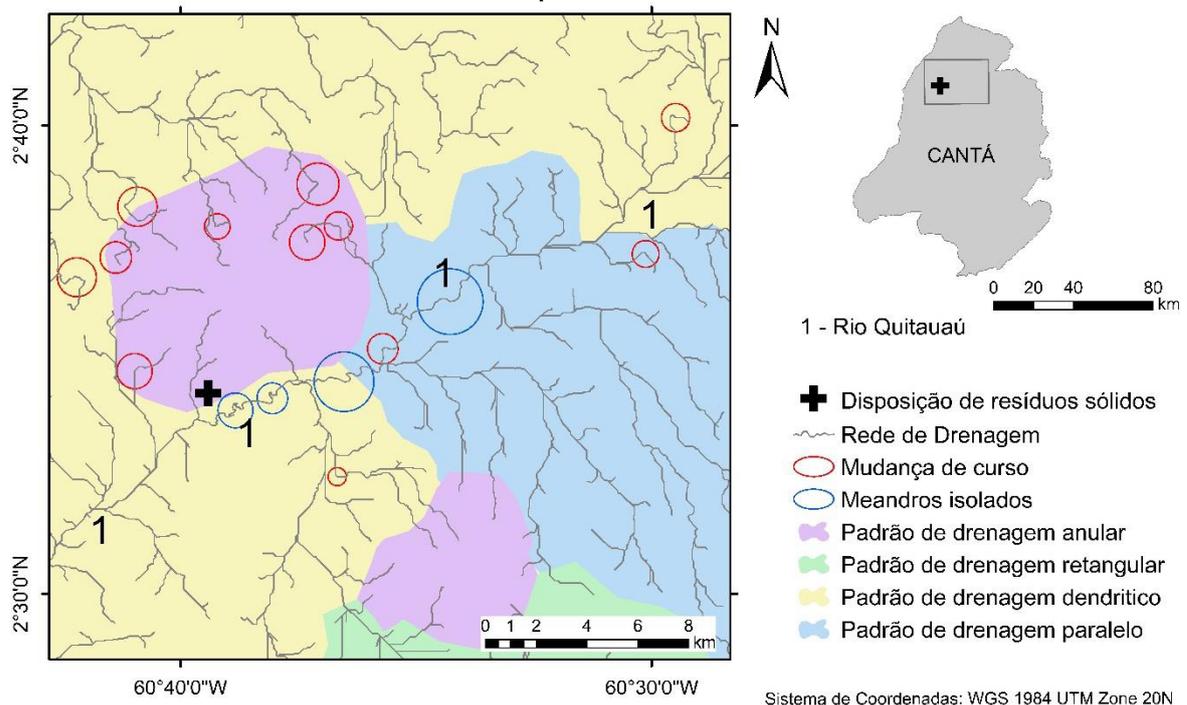
A área de disposição de resíduos sólidos no município de Cantá está localizada próximo ao rio Quitauaú e este deságua no rio Branco. A rede de drenagem na área adjacente à disposição de resíduos (Figura 43) apresenta quatro padrões de drenagem característicos. Nas porções oeste, norte e sudoeste da área fora identificado o padrão dendrítico, evidenciando transição de

um padrão geológico cristalino, isto é, da Suíte Metamórfica Rio Urubu para um sedimentar (Formação Boa Vista). O padrão paralelo é presente nas porções central e sudeste. Dois altos estruturais (Serra do Cantá a noroeste e Serra do Porco a sudeste) propiciam a formação do padrão anelar em porções centro-oeste e sul-sudeste da área. A sul também se nota canais com padrões retangulares, muito característicos de ambientes cristalinos (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Nas zonas de transição entre os padrões de drenagem anelar e dendrítico há certa frequência de anomalias de drenagem, com mudanças de curso em 90°. O rio Quitauaú apresenta muitos meandros comprimidos e nota-se a repetição dessas anomalias em todo o seu curso incluso na área da figura 43, reforçando a inferência de forte controle tectônico na área. Essa ponderação é suportada por trabalhos conceituais como os de Christofolletti (1980) e Villela e Mattos (1975) e o realizado na Amazônia por Souza e Rossetti (2011).

O curso d'água a leste da área de disposição de resíduos do município de Cantá apresenta forte retilinearidade e poucos meandros o que não se nota no rio Quitauaú (que flui no sentido NE-SW), cujos meandros sugerem ação tectônica no sentido perpendicular a seu fluxo superficial, aludindo que o fluxo subsuperficial a partir da localização da área de resíduos pode se iniciar no sentido NNW-SSE e quando alcança o rio Quitauaú, obedece ao seu sentido, i. e., NE-SW.

Figura 43 – Padrões de drenagem do entorno da área de disposição de resíduos sólidos do município do Cantá/RR.



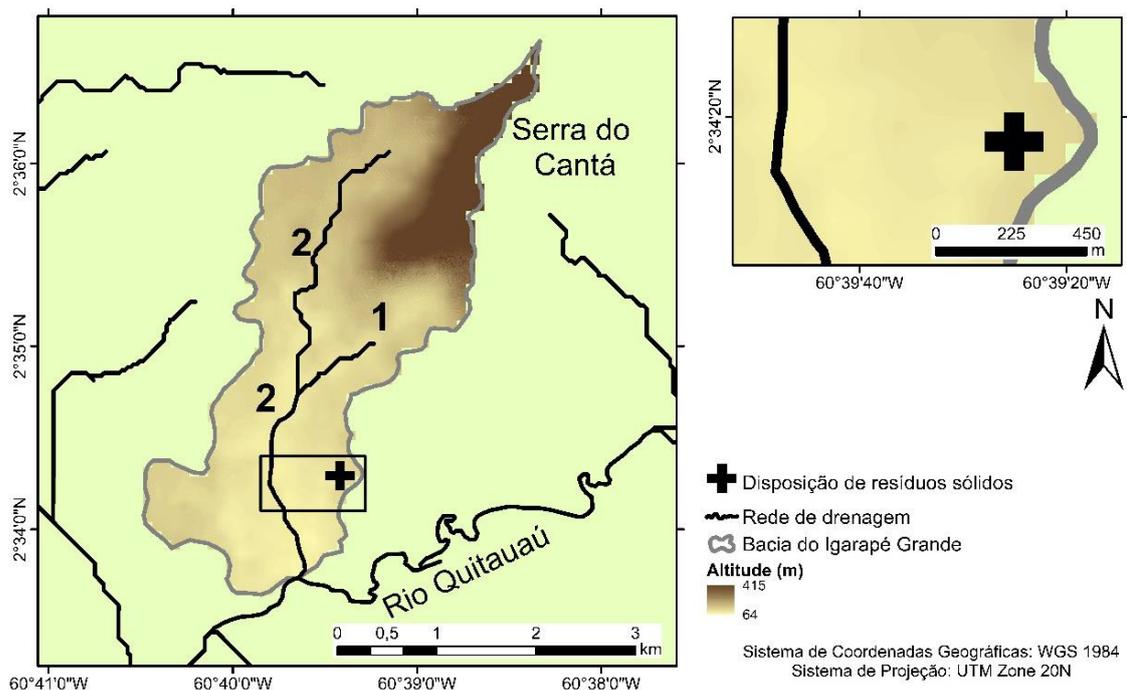
Fonte: Próprio autor (2020).

A figura 44 a seguir apresenta a delimitação da bacia, que possui área de 8,77 km² e perímetro de 17,93 km e fator de assimetria de 46,41, basculada sutilmente para a esquerda (Figura 45), e padrão de drenagem predominantemente paralelo (quando se considera os limites da bacia). O leve basculamento da bacia associado ao posicionamento da área de disposição de resíduos sólidos nesta porção, pode auxiliar aprisionamento de um possível fluido contaminador nesta região com possível tendência de deslocamento para o sul.

O curso d'água principal da bacia é o igarapé Grande (nome atribuído por moradores da vizinhança, sem nomenclatura específica em cartografia oficial), que nasce a partir da Serra do Cantá, porção nordeste da figura 44, com direção NNE-SSW inicialmente e posteriormente NW-SE. A área de disposição de resíduos se situa na porção sul da bacia e nas partes mais baixas, o que faz com que o fluxo de possíveis contaminantes migra mais a sul, no sentido do rio Quitauaú.

O igarapé Grande possui 5,23 km de extensão e sinuosidade de 1,19, indicando que o canal é predominantemente retilíneo, proporcionando bom transporte de sedimentos. A figura 44 apresenta a classificação dos cursos d'água por Horton (1957), sendo esta bacia de 2^a ordem e isso indica que, o material precipitado na área da bacia interage com no máximo dois canais até chegar ao exutório (no caso em questão, o rio Quitauaú), o mesmo ocorre com sedimentos e com contaminantes que, porventura, insiram-se na dinâmica hídrica.

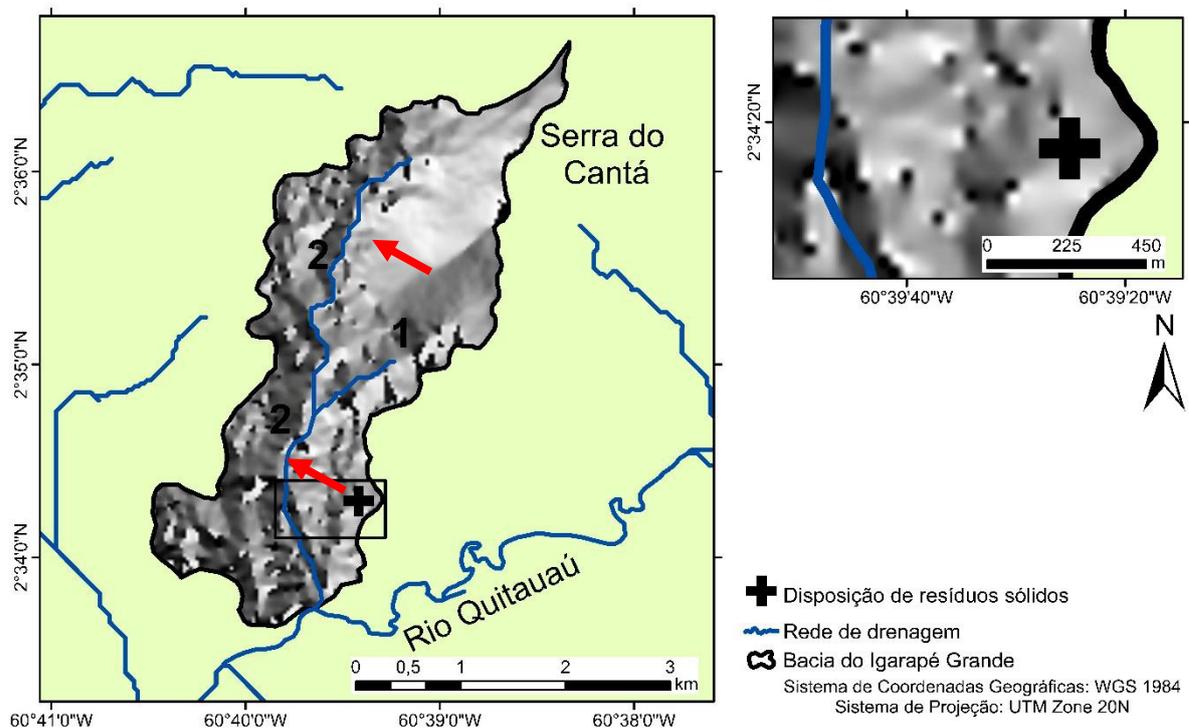
Figura 44 – Delimitação da bacia no entorno do lixão, município do Cantá, RR. Os valores numéricos indicam a ordem dos canais, de acordo com a classificação de Horton.



Fonte: Próprio autor (2020).

A figura 45 apresenta o relevo sombreado (ângulo azimutal de 315° e zenital de 45°) da bacia. O cálculo dos parâmetros morfométricos permitiu verificar as seguintes características: coeficiente de compacidade de 1,70 e o fator de forma com valor baixo, de 0,25, podendo inferir por intermédio desses parâmetros baixa propensão a enchentes, visto que o fator de forma caracteriza a bacia como alongada e o coeficiente de compacidade superior a 1,50 indica disparidade da geometria da bacia em relação ao formato circular, sendo estas conclusões reforçadas pelo índice de circularidade de 0,34, indicando fraca similaridade da bacia com um círculo de mesmo perímetro (SILVA et al., 2020). A bacia também apresenta baixa densidade de drenagem, 0,71 km/km², que pode indicar alta permeabilidade do solo, conforme associação realizada por Villela e Mattos (1975).

Figura 45 – Relevo sombreado da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR). As setas indicam o sentido do basculamento da bacia (para esquerda).



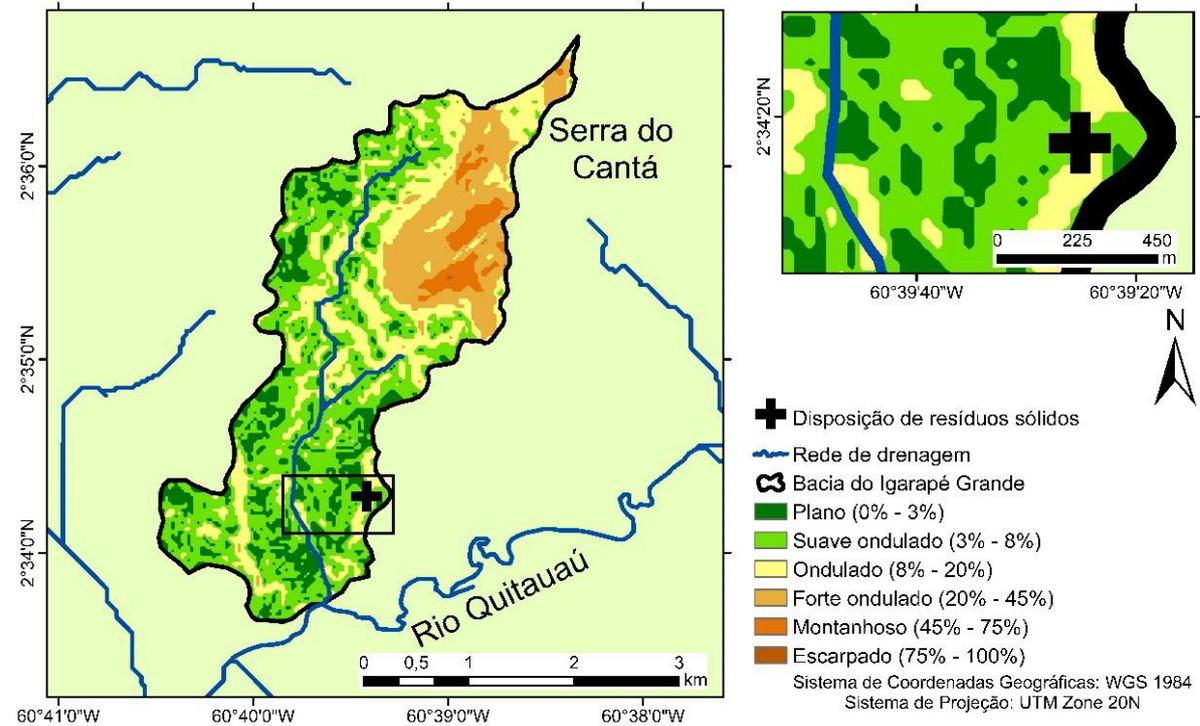
Fonte: Próprio autor (2020).

As vertentes da bacia são predominantemente classificadas como suave-onduladas (8% a 20%) a onduladas (20% a 45%), ambas contemplam um total de 65,12% da área da bacia (Figura 46), sendo que as vertentes no entorno da área de disposição de resíduos são predominantemente onduladas numa faixa que se estende na direção N-S, tal fato indica alta tendência a escoamento superficial no mesmo sentido em relação ao rio Quitauaú. A relação de escoamento superficial e declividade foi observada por Silva et al. (2020).

A bacia de drenagem apresenta amplitude altimétrica variando de 64 a 415 m (Figura 47), sendo a média de 371,54 m, conforme mapa hipsométrico, mas vale considerar que boa parte dessa amplitude se concentra na porção setentrional da bacia e se deve a Serra do Cantá, responsável pela faixa de 150-415 m. Boa parte da área (51,95%) está compreendida entre 64 e 100 m, mesma faixa em que se situa a área de disposição de resíduos sólidos do município de Cantá. Regiões mais baixas tendem a receber o escoamento superficial.

Como a região é caracterizada geomorfologicamente como colinas amplas e suaves (LADEIRA; DANTAS, 2014), juntamente com o formato alongado da bacia (índice de circularidade de 0,34), o escoamento superficial é favorecido, apresentando baixo risco de enchente em condições normais de precipitação, conforme Villela e Mattos (1975).

Figura 46 – Mapa de declividade da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR).

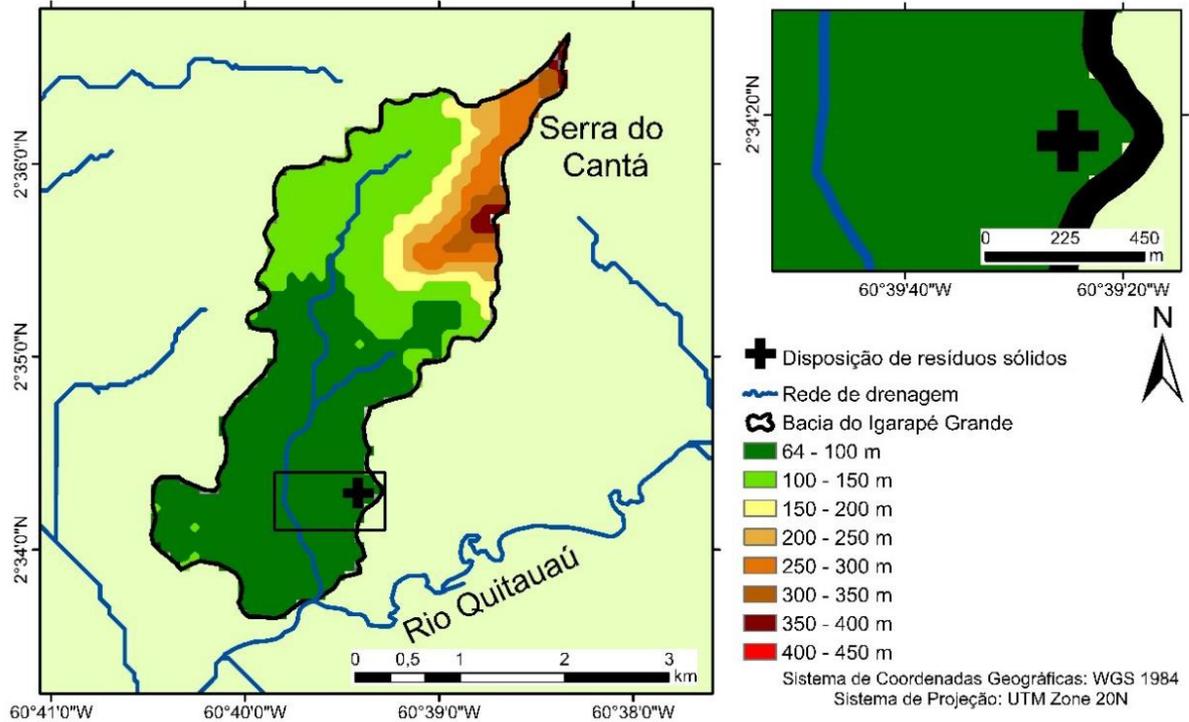


Fonte: Próprio autor (2020).

No que diz respeito à orientação das vertentes (Figura 48), verificou-se que o somatório das vertentes leste, nordeste, norte, oeste e noroeste contemplam 63,28% da área da bacia. O total das vertentes direcionadas ao sudeste, sul e sudoeste (vertentes de conservação de umidade, conforme Motta et al. 2017) totaliza 36,72% da área drenada, com menor incidência de radiação solar. Portanto, a bacia do Igarapé Grande tem maior tendência de evapotranspiração do que conservação de umidade. Ao se analisar a área no entorno da disposição de resíduos, nota-se a predominância de vertentes na direção noroeste e oeste, o que

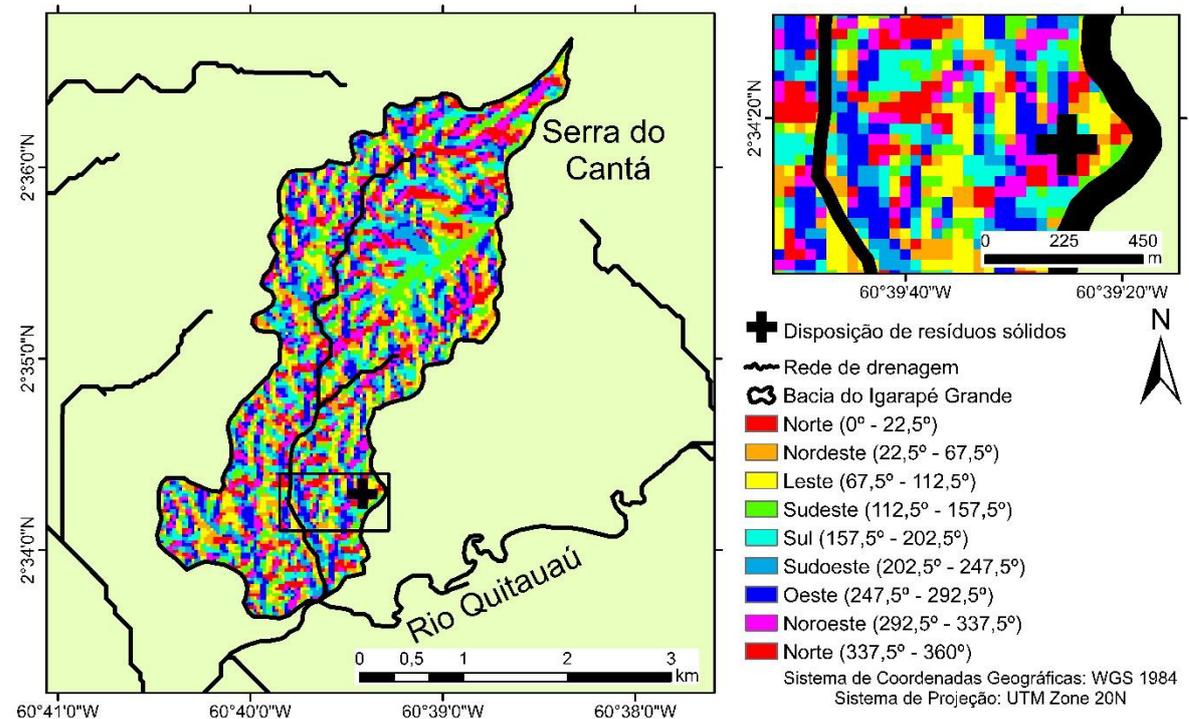
sugere que o fluxo preferencial é nessas direções e que o processo predominante é o de evapotranspiração ao longo do dia e do ano.

Figura 47 – Mapa hipsométrico da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 48 – Orientação das vertentes da bacia do igarapé Grande (Cantá, RR).



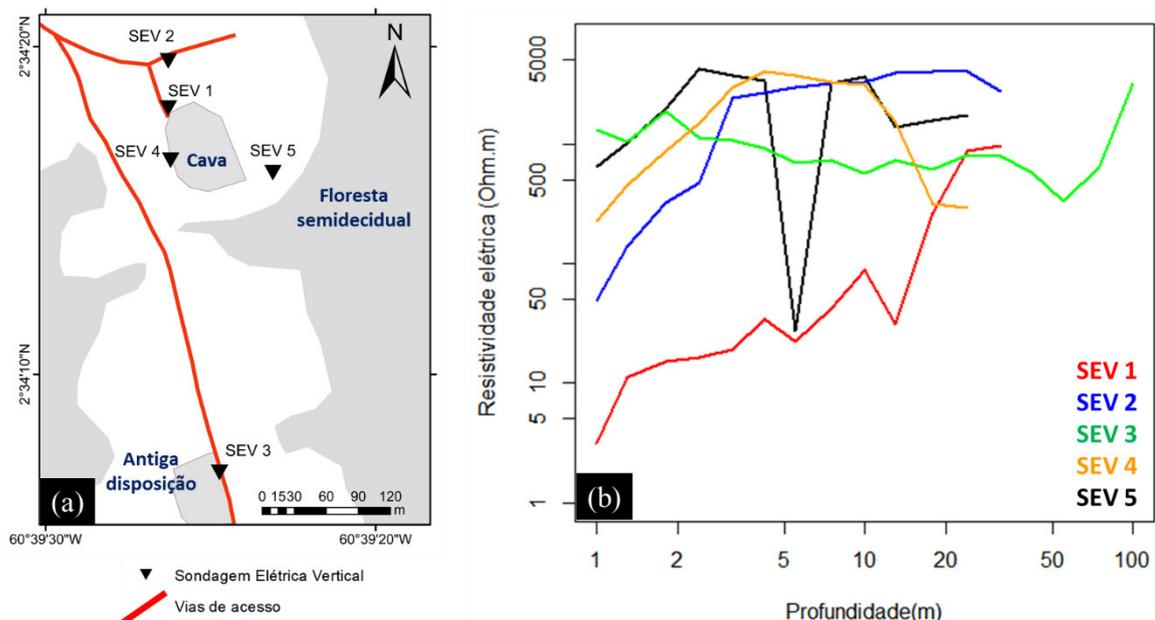
Fonte: Próprio autor (2020).

Em suma, a bacia considerada é predominantemente plana, alongada, baixa densidade de drenagem, e maior tendência de dispersão de umidade em superfície por constar vertentes concentradas nas direções com maior incidência solar, compondo um quadro de condicionantes que favorecem o escoamento superficial, que, de certa forma, podem mitigar a produção e percolação do chorume em subsuperfície.

4.2.2 Assinatura geofísica

A partir do levantamento geofísico, isto é, as cinco sondagens elétricas verticais (SEV) prospectadas para o município de Cantá, fizeram-se inferências quanto ao comportamento geoeletrico da área de disposição de resíduos sólidos, associando a resistividade elétrica ao meio geológico, em que se encontram rochas como diabásio (REIS; FRAGA, 1998). A figura 49 apresenta o resumo da locação e das curvas de resistividade aparente obtidas em campo. Os dados obtidos em campo das cinco SEV estão presentes, respectivamente, nos Apêndices F, G, H, I e J.

Figura 49 – Levantamento eletrorresistivo na área de disposição de resíduos sólidos no município do Cantá/RR. (a) Locação das SEV. (b) Gráfico de profundidade x resistividade aparente.

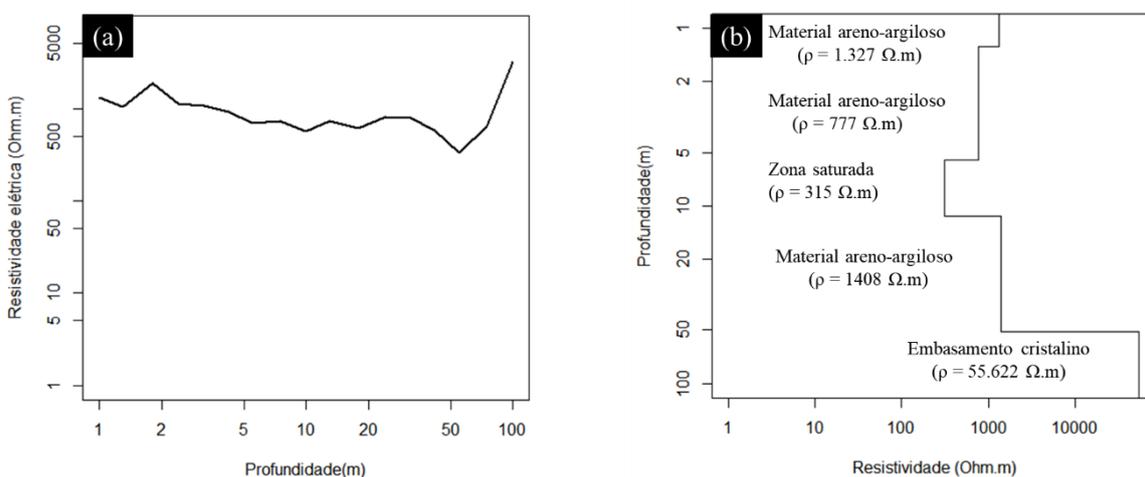


Fonte: Próprio autor (2020).

4.2.2.1 Padrão Geométrico 1 (SEV 3)

O referido padrão contou apenas com a SEV 3 (tipo QH, conforme o método comparativo de Braga (2006)). Esta tem alcance de profundidade de 100 metros, localizada na estrada de acesso ao rio Quitauaú, próximo ao antigo “lixão” (Figura 49a), onde foi possível obter a maior abertura, possibilitando, assim, melhor relação com o meio geológico. A figura 50a-b mostra a curva de resistividade elétrica, bem como a sua plausível associação ao meio litológico relacionado, denotando assim, o perfil elétrico em profundidade.

Figura 50 – Configuração da Sondagem Elétrica Vertical 3 (SEV 3) (Cantá/RR). (a) Curva de resistividade aparente. (b) Interpretação das camadas, por meio do processo de inversão, com o *IPI2WIN*.



Fonte: Próprio autor (2020).

O processo de inversão foi efetuado com minimização de erros com cinco camadas (erro de 2,05%, ver figura 50b). A primeira, de espessura estimada de 1,26 m tem aspecto principalmente arenoso, com teor argiloso em sua composição. Os valores de resistividade nessa primeira camada atingem 1.850,8 $\Omega.m$ na curva de resistividade aparente e 1.327 $\Omega.m$ na interpretação por processo de inversão, corroborando o caráter arenoso das camadas superficiais, bem como o teor argiloso, que, diferentemente do perfil interpretado para a área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre, este não apresenta concreções lateríticas, o que diminui a porosidade e, conseqüentemente, diminui a resistividade (SOUZA; ANDRADE; MORAES, 2018; SOUZA; CARVALHO, 2017).

A segunda camada (espessura estimada de 4,25 m, figura 50b) é marcada por comportamento descendente e serrilhado, o que sugere aumento gradual de saturação, mas como os valores de resistividade aparente não variam significativamente (máximo de 1.111,3

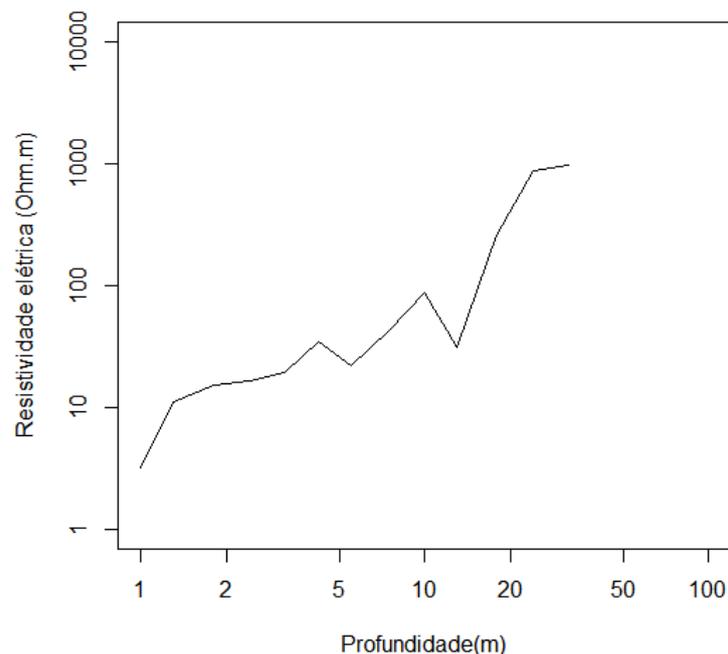
$\Omega.m$ a 2,4 m e mínimo de 812 $\Omega.m$ a 24 m de profundidade, e o valor de resistividade pela inversão é de 777 $\Omega.m$). É inferido que a composição litológica não varia significativamente nessas profundidades, perfazendo aspecto quase homogêneo e, com a variação topográfica pouco significativa com o rio Quitauaú, sugere-se que o nível d'água localiza-se na zona de transição da terceira para a quarta camada (11,5 m), sendo este nível considerado raso.

A terceira camada (Figura 50b) é identificada pelo processo de inversão, com resistividade real estimada de 315 $\Omega.m$, sendo distinta da quarta camada (compreendida por caráter areno-argiloso) e esta última distinguida da quinta camada pela presença de um ponto de inflexão ascendente aos 55 m, com resistividade estimada de 55.622 $\Omega.m$, sugerindo que há presença de embasamento cristalino. Rochas cristalinas costumam apresentar valores de resistividade altos, acima de 10.000 $\Omega.m$ (BORTOLIN, 2009; BRAGA, 2016; SOUZA; CARVALHO, 2017).

4.2.2.2 Padrão Geoeletrico 2 (SEV 1)

Para este padrão temos a SEV 1 com profundidade de 32 metros (tipo A, conforme o método comparativo de Braga (2006)). Esta foi realizada na entrada da cava de resíduos, onde há alocação dos resíduos pelo caminhão (Figura 49a). A figura 51 apresenta a curva de resistividade aparente, configurando o perfil elétrico em profundidade.

Figura 51 – Curva de resistividade aparente da SEV 1 (Cantá/RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

De maneira geral, a curva apresenta aspecto ascendente de 1,0 m até os 10 m de profundidade, com valores variando de 3,6 Ω .m a 261,8 Ω .m. Valores de resistividade nessa ordem de grandeza são fortemente associados à presença de contaminação, e. g. Bortolin e Filho (2010), Gomes et al. (2016), Mepaiyeda et al. (2019), Moreira et al. (2013), Silva et al. (2018), Souza e Carvalho (2017) e Souza, Andrade e Moraes (2018). Visto que, em áreas de despejo de resíduos de forma inadequada, o chorume formado penetra em profundidade diminuindo drasticamente os valores de resistividade, fato esse associado à presença de metais pesados contidos neste líquido.

Após leve decréscimo de resistividade entre 10m e 13 m de profundidade, a curva continua o comportamento ascendente atingindo 1.273,6 Ω .m aos 18 m e se estabilizando nessa faixa até os 32 m de profundidade. Esta conotação é semelhante aos valores de resistividades obtidos na SEV 3, que foi associada ao meio geológico, o que indica que o lixiviado (i. e., o chorume) pode ter sido contido nas camadas superficiais (1,0-10 m de profundidade).

4.2.2.3 Padrão Geométrico 3 (SEV 2, 4 e 5)

As SEV 2, 4 e 5 (Figura 49a) retratam o padrão geométrico 3 (tipo K, conforme o método comparativo de Braga (2006)). A SEV 2 foi realizada na via de acesso à cava de resíduos com profundidade de 32 m e as SEV 4 e 5 nas porções oeste e sudeste da cava, respectivamente, ambas com 24 m de profundidade. Estas sondagens possuem aspectos gerais fortemente similares, cujas geometrias retratam um formato convexo: (a) baixos valores de resistividade nas primeiras metragens de profundidade; (b) altos valores nas camadas intermediárias; e (c) decréscimo a partir dos 10 metros de profundidade (Figura 52).

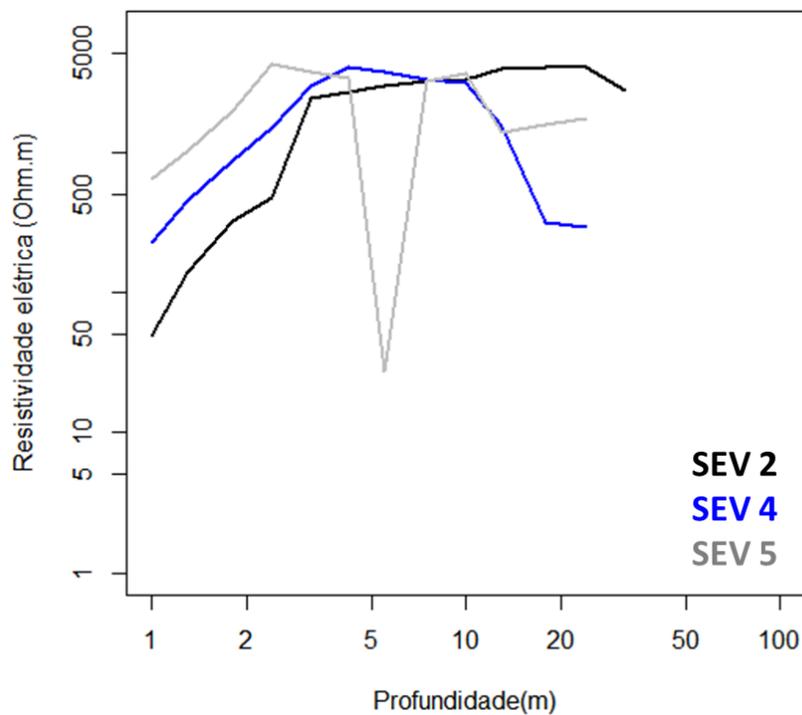
A SEV 2 se estabiliza a partir dos 2,4 m de profundidade, tendo ascensão suave até os 24 m, o que sugere que o meio é relativamente homogêneo (de material areno-argiloso, ver figura 50b), e, pelos valores de resistividade aparente ($2.428,4 < \rho_a < 4.026,4 \Omega$.m). As SEV 4 e 5 apresentam certa estabilidade no intervalo 3,2-10 m ($2.933,6 < \rho_a < 3.610,6 \Omega$.m) indicando certa homogeneidade a essas profundidades.

No entanto, a SEV 5 apresentou decréscimo abrupto de resistividade aos 5,5 m de profundidade ($\rho_a = 32,7 \Omega$.m) estabilizando-se novamente aos 7,5 m ($\rho_a = 3.177,7 \Omega$.m), sugerindo presença de materiais altamente condutivos, podendo ser influenciado pela migração de lixiviado lateralmente, visto que esta sondagem se localiza no entorno da cava de disposição de resíduos, e ainda considerando a interpretação das camadas do meio geológico (que

apresenta material areno-argiloso, com aumento do grau de saturação a partir de 5,15 aos 11,5 m), sugerindo que o nível da água pode estar próximo a essa profundidade, favorecendo a diluição e espraiamento lateral do chorume advindo da cava de resíduos. Souza e Andrade (2018) identificaram para a área do lixão do município de Boa Vista/RR valores nesta ordem ($\rho_a < 700 \Omega.m$) à presença de contaminação, corroborando com a hipótese.

As SEV 4 e 5 mostraram decréscimo a partir dos 10 m de profundidade, a possibilidade de haver solo com teor mais argiloso que as profundidades acima. O decréscimo de resistividade pode estar associado ao aumento de coesão entre as partículas de argila, que favorecem a passagem de corrente elétrica, tornando as camadas mais condutivas (BRAGA, 2016).

Figura 52 – Curva de resistividade aparente das SEV 2, 4 e 5 (Cantá/RR).



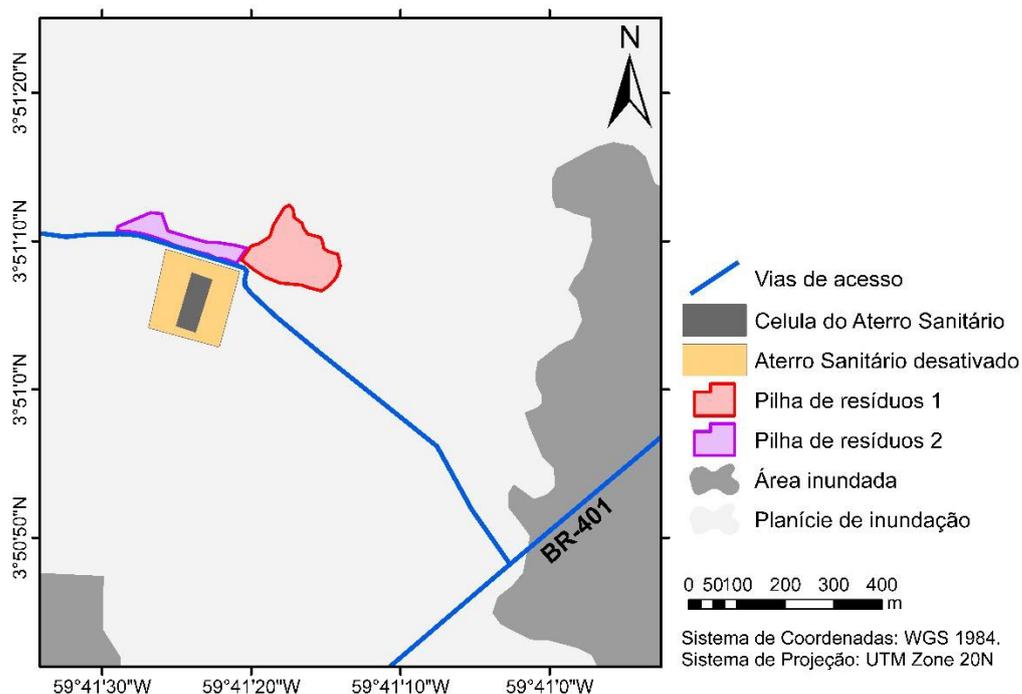
Fonte: Próprio autor (2020).

4.3 DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE NORMANDIA

O município de Normandia possui um aterro sanitário, que teve sua concepção realizada em 2016, porém não está em operação. Os resíduos são dispostos na parte externa deste, isto é, na área externa do aterro sanitário desde o ano de 2013, dispendo de 12 a 15 m³ de resíduos por dia. A área localiza-se a cerca de 6 quilômetros da sede do município, podendo ser acessada por meio da BR-401 (Figura 53).

O local foi visitado no dia 14 de junho de 2019 para localização, inspeção prévia e visualização na estação chuvosa, e nos dias 13 e 14 de dezembro de 2019 para o levantamento elétrico (total de cinco SEV) e verificação das características no período seco.

Figura 53 – Desenho esquemático da área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia, RR.



Fonte: Próprio autor (2020).

A área possui dois locais de empilhamento de resíduos. O primeiro localizado a margem direita da via de acesso ao aterro sanitário desativado, é o que apresenta o maior volume de resíduos, este disperso por uma extensa área, formando empilhamento espreado (Figura 54a), sendo que os resíduos evidenciam ter passado por incineração, visto que os materiais de vidro e metal oxidado são predominantes (Figura 54b). Grande parte dos resíduos está coberto pela

vegetação na estação chuvosa e com acúmulo de água, o mesmo acontece com a pilha de resíduos 2 (Figura 54c).

Figura 54 – Área de disposição de resíduos sólidos de município de Normandia/RR. (a) Vista frontal da entrada do aterro sanitário desativado (à esquerda) e a pilha de resíduos sólidos 1 (à direita). (b) e (c) Resíduos encontrados na pilha de resíduos 1 na estação chuvosa. (d) Área inundada dentro da disposição de resíduos. (e) Planície de inundação do igarapé Pau Grande na área externa.



Fonte: Próprio autor (2020).

A segunda pilha se localiza ao lado da pilha 1 e se estende pela margem direita da via que passa pela lateral do aterro sanitário. Na estação chuvosa, a área fica completamente

alagada, visto que a região é predominantemente plana e com extensas áreas de planícies de inundação (Figura 54d-e), fazendo com que o material precipitado interaja com os resíduos domésticos que são dispostos nas pilhas pela coleta do município (Figura 54d).

Durante o período seco fora realizado o levantamento elétrico, sendo constatado a frequente prática de incineração dos resíduos, conforme as imagens presentes na figura 55. Essa ação não é prevista nas normas de concepção de aterros sanitários (ABNT, 1992; 2010) além de considerar que o uso do fogo provoca poluição do ar. A composição dos resíduos após a incineração fica predominantemente composta por vidros e metais, visto que outros materiais acabam passando pelo processo de combustão.

Figura 55 – Áreas de disposição de resíduos sólidos de Normandia/RR no período seco. (a) Incineração de resíduos. (b) Resíduos sólidos incinerados. (c) Vista panorâmica da pilha de resíduos 1 (ver Figura 53). (d) Pilha de resíduos 2 (ver Figura 53), durante a realização de uma das sondagens elétricas, ao fundo, resíduos incinerados.



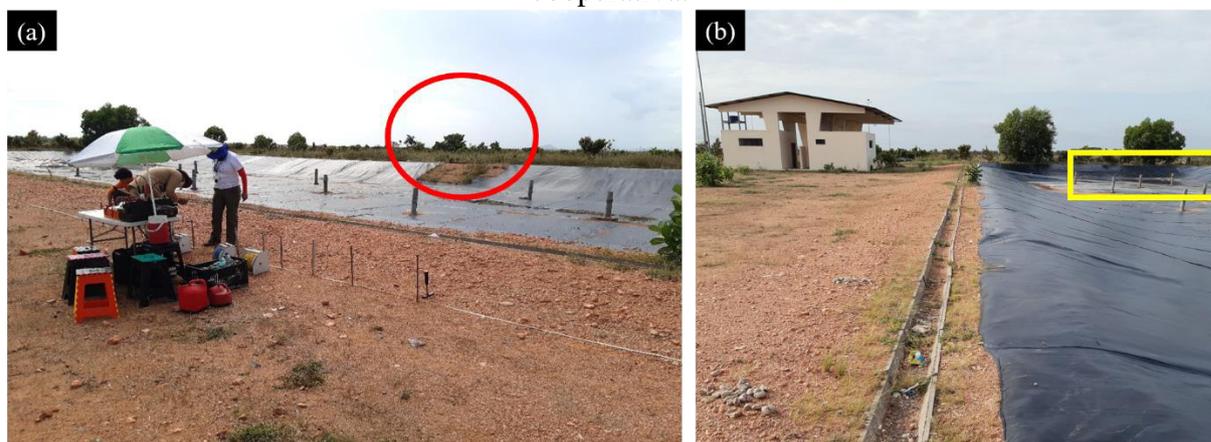
Fonte: Próprio autor (2020).

Outro ponto a se destacar é o aterro sanitário desativado, que apresenta uma célula com medidas aproximadas de 125 m de comprimento por 45 m de largura no formato de tronco de pirâmide, revestida por geomembrana (para impermeabilização da célula) e conta com um sistema de drenagem de gases, possuindo características compatíveis com um aterro sanitário de pequeno porte em valas, prescrito pela NBR 15.849 (ABNT, 2010).

Embora haja o empreendimento, o aterro sanitário nunca foi inaugurado, permanecendo desativado desde a finalização de sua concepção, e com isso, a geomembrana da célula já apresenta sinais de deterioração (Figura 56a) e acúmulo de água parada em sua base (Figura 56b).

Com base em todas as características apresentadas, pode-se afirmar que, ainda que o município possua um aterro sanitário construído, o método de disposição dos resíduos sólidos é por lixão a céu aberto, da mesma forma como os outros dois municípios já considerados até aqui, representando um risco potencial de contaminação do solo, ar, águas superficiais e subterrâneas.

Figura 56 – Aterro sanitário desativado do município de Normandia/RR. (a) Célula do aterro sanitário, durante a realização de uma das sondagens elétricas (no círculo vermelho, nota-se que a geomembrana já apresenta manifestações patológicas). (b) Acúmulo de água na base da célula (retângulo amarelo), na lateral direita, encontra-se a edificação que funcionaria como cooperativa.



Fonte: Próprio autor (2020).

4.3.1 Caracterização morfométrica

A área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia está localizada entre os igarapés Pau Grande e Zé Preto, que desaguam no rio Maú e este desagua no rio Tacutu.

A rede de drenagem na área no entorno da disposição dos resíduos é apresentada na figura 57. Três padrões de drenagem foram observados, primeiramente o paralelo, que se concentra na porção central e leste da área, apresentando também a formação de lagos, como o Caracaranã. O padrão treliça é presente nas porções oeste e norte. Nas porções sul e em fragmentos da porção central e norte, foi identificado um padrão retangular.

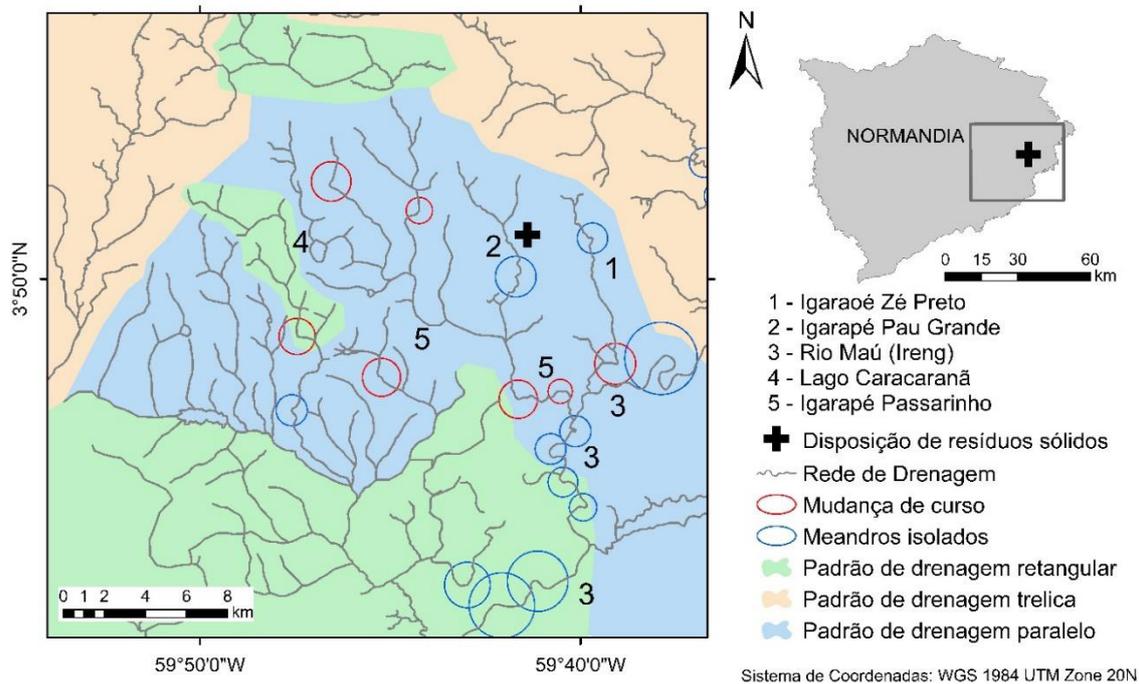
Nota-se que há forte variação de padrão de drenagem na porção oeste da área, sendo isso possivelmente explicado pela zona de transição entre um meio geológico mais cristalino (Suíte Intrusiva Saracura) para sedimentar (Formação Boa Vista) e esta configuração sugere a presença de anomalias de drenagem, sendo isso confirmado ao se observar a concentração de meandros comprimidos na porção sudeste (Figura 57). Essas anomalias são associadas à forte controle tectônico na área conforme descritos para regiões amazônicas (MOREIRA; PEREZ FILHO, 2018; SOUZA; ROSSETTI, 2011).

Nas zonas mais próximas a área de alocação dos resíduos sólidos urbanos, percebe-se concentração de anomalias na porção SE, especialmente de meandros comprimidos, variando de N-S para E-W, e isto ocorre em três canais no entorno da área (igarapés Pau Grande e Passarinho e rio Maú), sugerindo movimentação tectônica em comum, que pode ter iniciado um processo de compressão, que resultou na reconfiguração destes corpos hídricos, alterando sua direção de fluxo e também na transição dos padrões retangular, para paralelo e treliça (Figura 57).

Portanto, quando se considera as compressões dos meandros à jusante da área de disposição de resíduos sólidos no município de Normandia, sugere-se a possível presença de fraturamentos em subsuperfície advindos da ação tectônica, o que favorece a formação de caminhos preferenciais para o fluxo subterrâneo e, nos casos considerados, a hipótese e de que o fluxo preferencial se configura, principalmente no sentido NW-SE.

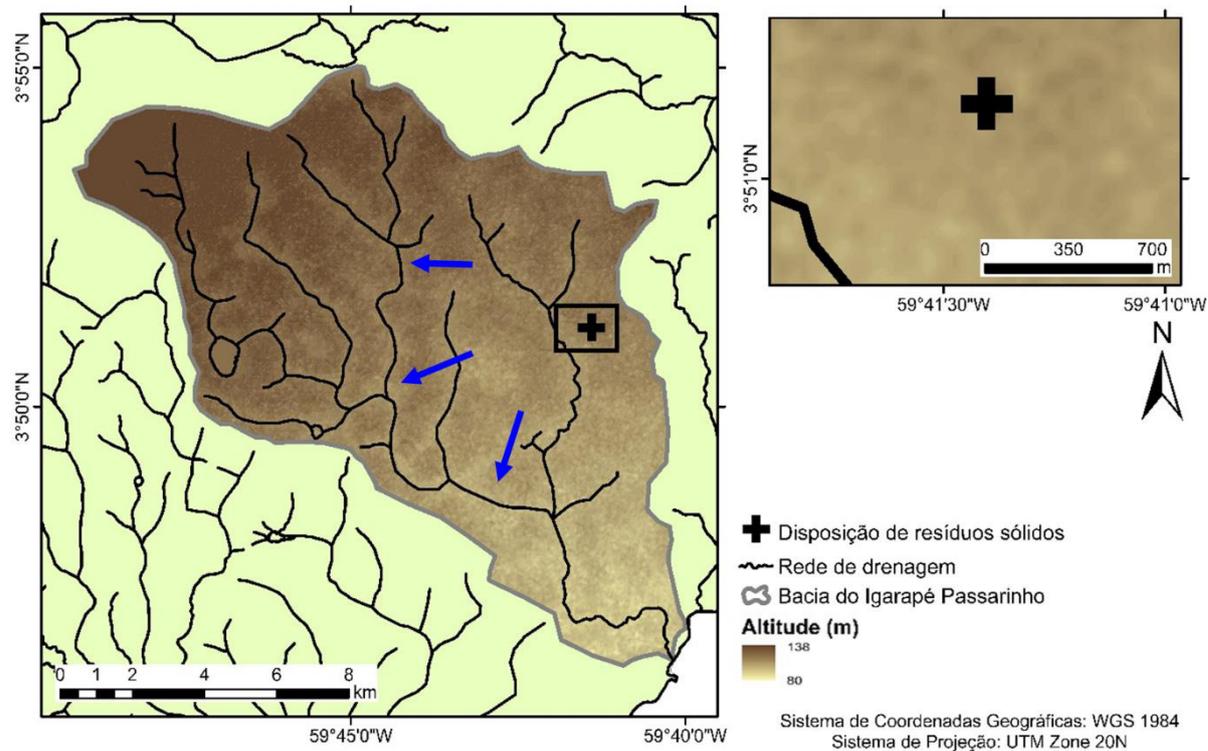
A figura 58 mostrada a seguir apresenta a delimitação da bacia no entorno do lixão, que possui área de 147,14 km² e perímetro de 58,84 km e fator de assimetria de 42,50, basculada para a direita, configurando a bacia certa estabilidade tectônica, quando se considera a bacia holisticamente e padrão de drenagem paralelo. Essa estabilidade pode contribuir para lateralização de um fluido contaminante que possa estar se formando em decorrência da interação da água da chuva com o empilhamento de resíduos alocado de forma irregular na área. O curso d'água principal da bacia é o Igarapé Passarinho, nascente na porção norte, com direção N-S inicialmente e NW-SE ao desaguar no rio Maú (ou *Ireng*).

Figura 57 – Padrões de drenagem do entorno da área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia/RR.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 58 – Delimitação da bacia no entorno do lixão, município de Normandia/RR. As setas indicam o basculamento para direita da bacia.

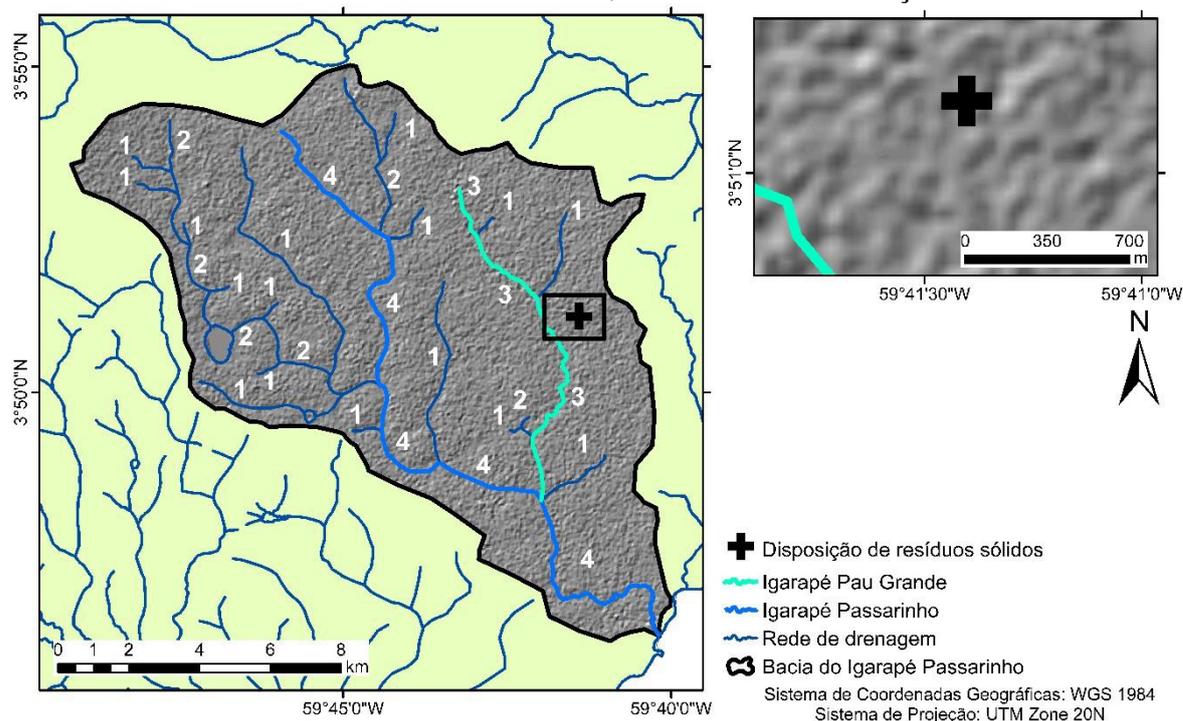


Fonte: Próprio autor (2020).

O igarapé Passarinho (Figura 59) possui 23,82 km de extensão e possui sinuosidade de 1,34, indicando que o canal é relativamente retilíneo, proporcionando bom transporte de sedimentos, contendo tendência de deposição em pontos de forte sinuosidade. O relevo sombreado (gerado considerando um ângulo azimutal de 315° e zenital de 45°) da bacia e a classificação dos cursos d'água por Horton (1957), caracterizando-a como de 4ª ordem, mas como a área se localiza próximo a um curso de 3ª ordem, o fluxo ao exutório é mais rápido.

A análise dos parâmetros morfométricos permitiu verificar que esta, em condições naturais, possui o coeficiente de compacidade de 1,36 e o fator de forma com valor baixo, de 0,32, e isto significa que a bacia possui baixa propensão a enchentes por causa de seu formato mais alongado (SILVA et al., 2020). A bacia também apresenta baixa densidade de drenagem, 0,58 km/km², que pode indicar boa capacidade de infiltração do solo, isto se compatibiliza com as características mais sedimentares da área (Formação Boa Vista).

Figura 59 – Relevo sombreado da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR). Os valores numéricos indicam a ordem dos canais, conforme a classificação de Horton.

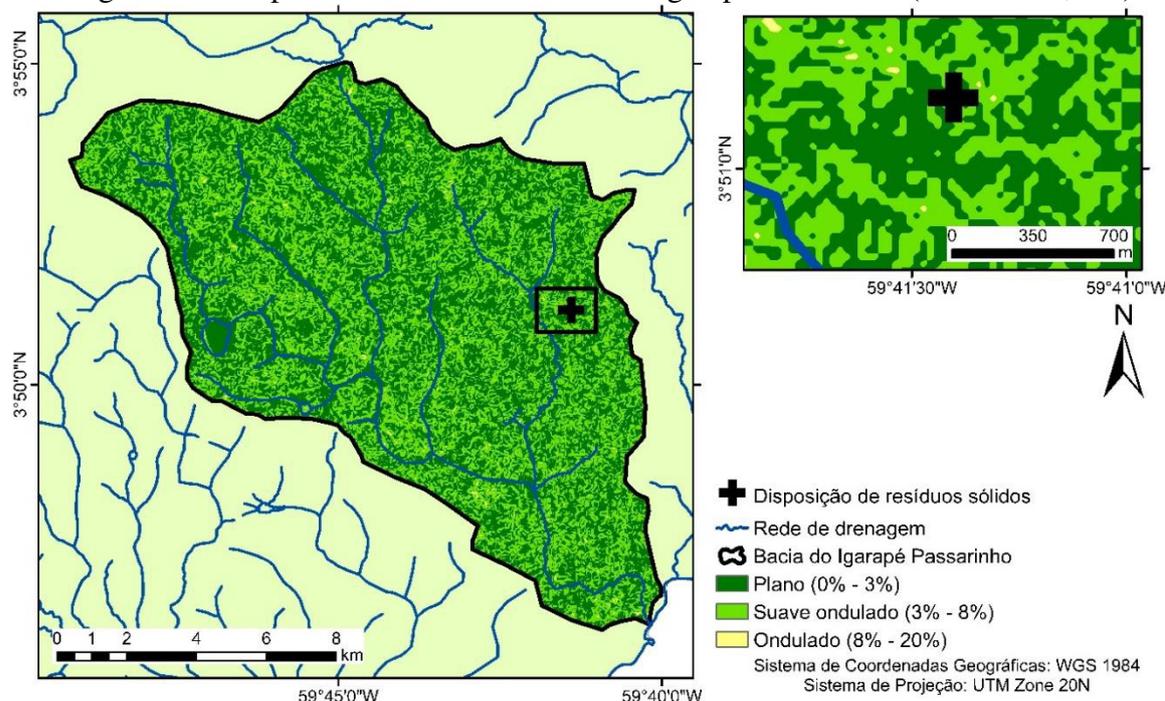


Fonte: Próprio autor (2020).

As vertentes da bacia são predominantemente planas (0% a 3%) a suave-onduladas (3% a 8%) totalizando, respectivamente, 56,89% e 42,55% da área da bacia, sendo 99,44% da área drenada. As vertentes onduladas representam uma parcela de 0,56%, sendo estas características observadas em pontos isolados na porção norte às adjacências da área de alocação dos resíduos.

De forma geral, o relevo é plano em torno da área indicando alta tendência de inundação pontual (Figura 60).

Figura 60 – Mapa de declividade da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR).



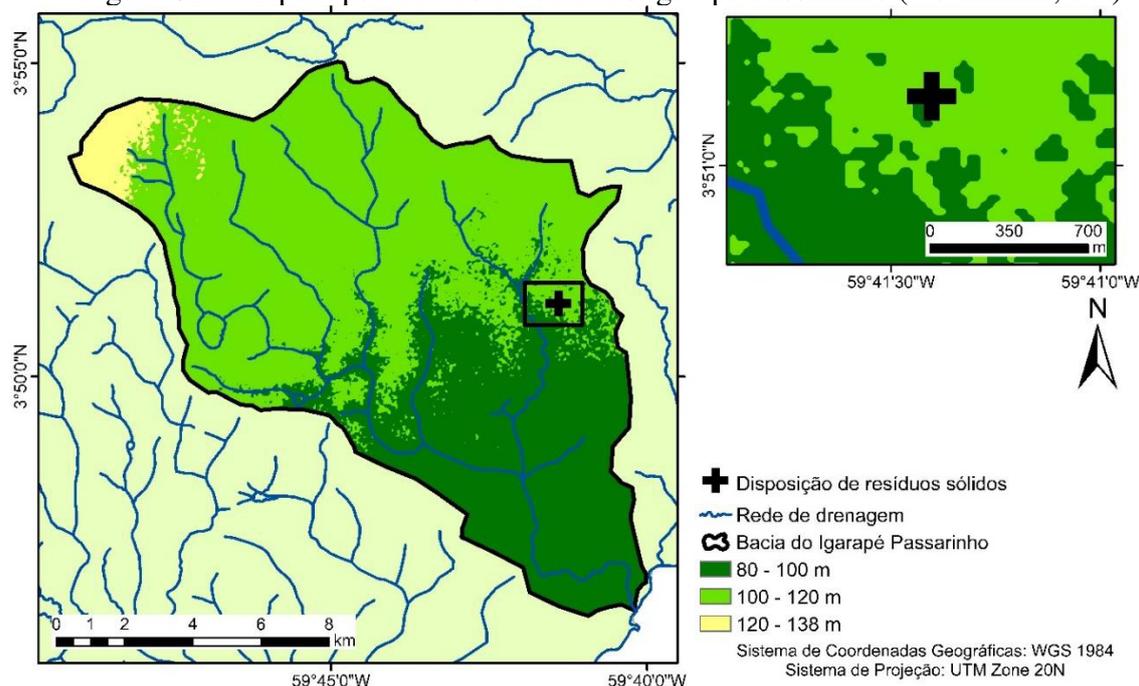
Fonte: Próprio autor (2020).

A bacia do igarapé Passarinho é que apresenta menor amplitude altimétrica dentre as outras duas da área, como se nota na figura 61, tendo o ponto mais baixo a 80 m e o mais alto a 138 m, e altitude média de 103,12 m, sendo que 59,32% da área se concentra entre as cotas de 100 a 120 m, aspecto característico da região, que se caracteriza como superfícies aplainadas (LADEIRA; DANTAS, 2014), isso é favorecido pelo formato alongado da bacia (índice de circularidade de 0,53), que favorece o escoamento superficial, apresentando médio risco de enchente em condições normais de precipitação, conforme Villela e Mattos (1975).

Com relação à orientação das vertentes (Figura 62), para a compreensão do comportamento da superfície em função da incidência de radiação solar ao longo do dia e do ano (MOTTA et al., 2017), tem-se que o somatório das vertentes leste, nordeste, norte, oeste e noroeste contemplam 59,14% da área da bacia.

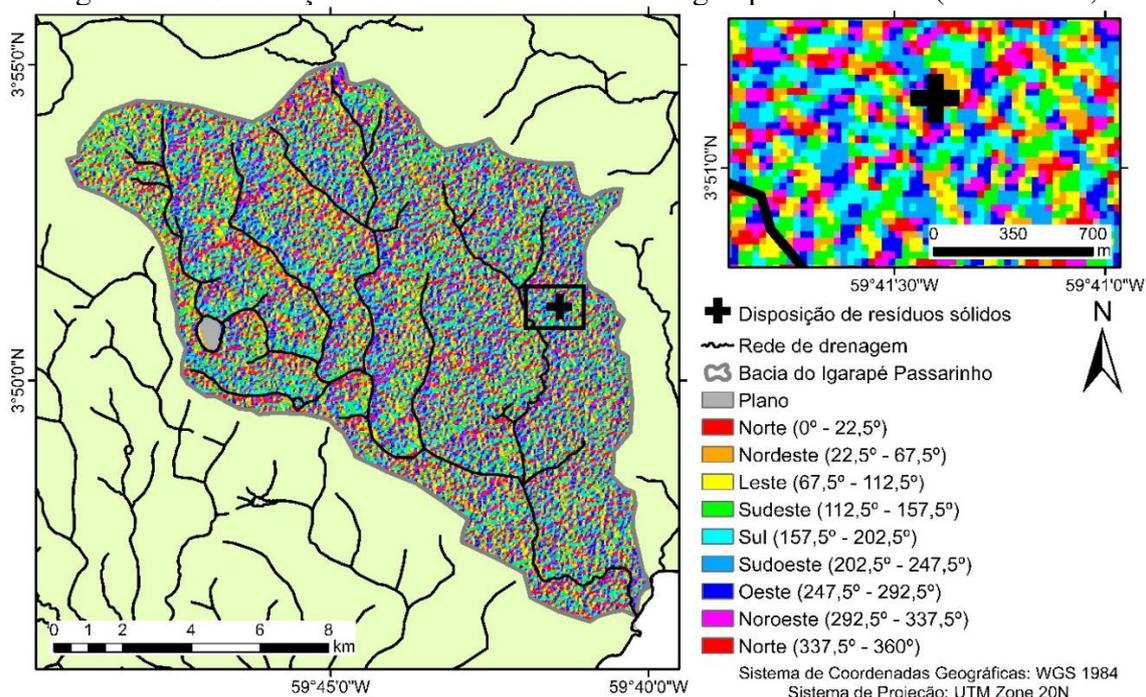
O total das vertentes direcionadas ao sudeste, sul e sudoeste perfazem 38,82% da área da bacia, que são de menor incidência de radiação solar. Portanto, a bacia, de maneira geral, tem alta tendência de dispersão de umidade, embora que, quando se considera o entorno da área de disposição final, há predominância de vertentes de conservação de umidade (i. e., sul, sudoeste e sudeste).

Figura 61 – Mapa hipsométrico da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 62 – Orientação das vertentes da bacia do igarapé Passarinho (Normandia, RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

A consideração dos padrões de drenagem e parâmetros morfométricos permitiram verificar que a bacia de drenagem do igarapé Passarinho caracteriza-se como plana, mal drenada, com vertentes de dispersão de umidade. Quando se analisa o entorno da área utilizada para alocação de resíduos, nota-se entre os corpos hídricos retilinearidade dos canais. A

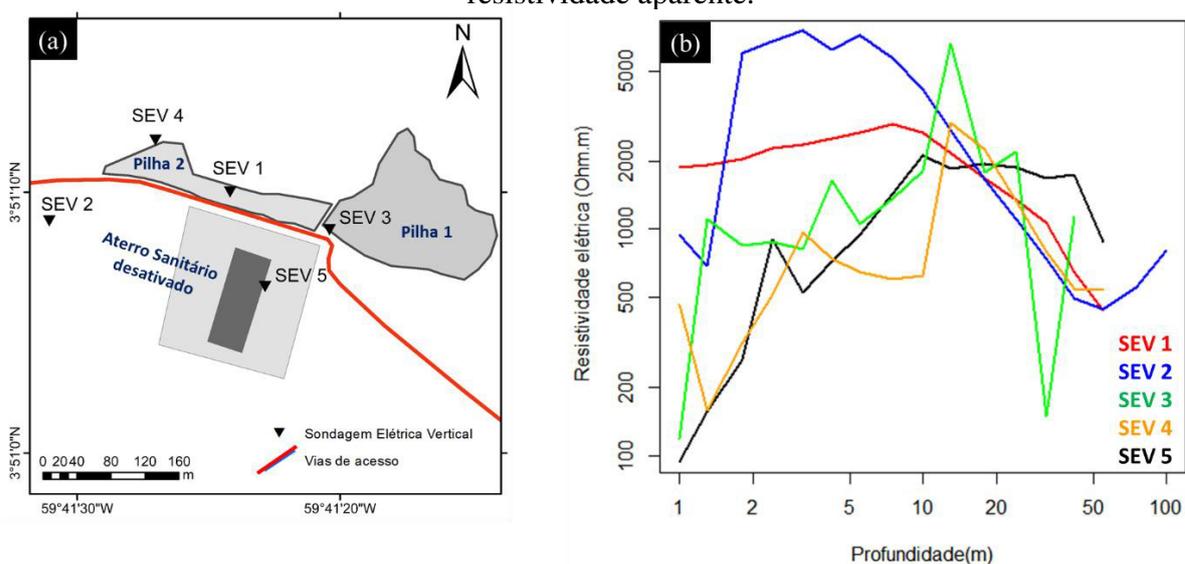
morfologia mais retilínea favorece o transporte de sedimentos em suspensão (CHRISTOFOLETTI, 1980; QUEIROZ, 2020).

Apesar dos parâmetros morfométricos apontarem para baixa propensão a enchentes, deve-se levar em consideração aspectos geomorfológicos da área, como baixa capacidade de absorção de água em locais com nível freático raso, característico de ambientes lacustres, como Morais e Carvalho (2015) descrevem Normandia e com diversas planícies de inundação sendo que estas características, associadas à baixa amplitude altimétrica proporcionam certa propensão a enchentes em pontos isolados.

4.3.2 Assinatura geofísica

O levantamento eletrorresistivo realizado na área de disposição de resíduos e em seu entorno somaram cinco SEV, cujo comportamento elétrico permitiu associar ao meio geológico predominante para a área, isto é, embasamento granítico da Suíte Intrusiva Saracura (SILVA; PORSANI, 2006). A figura 63 apresenta uma síntese da locação e das curvas de resistividade aparente obtidas em campo. As cinco SEV realizadas perfizeram porções próximas às pilhas (três sondagens), uma no aterro sanitário desativado e outra no entorno. Os dados obtidos em campo das cinco SEV estão presentes, respectivamente, nos Apêndices K, L, M, N e O.

Figura 63 – Levantamento eletrorresistivo na área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia/RR. (a) Posicionamento das SEV. (b) Gráfico de profundidade x resistividade aparente.

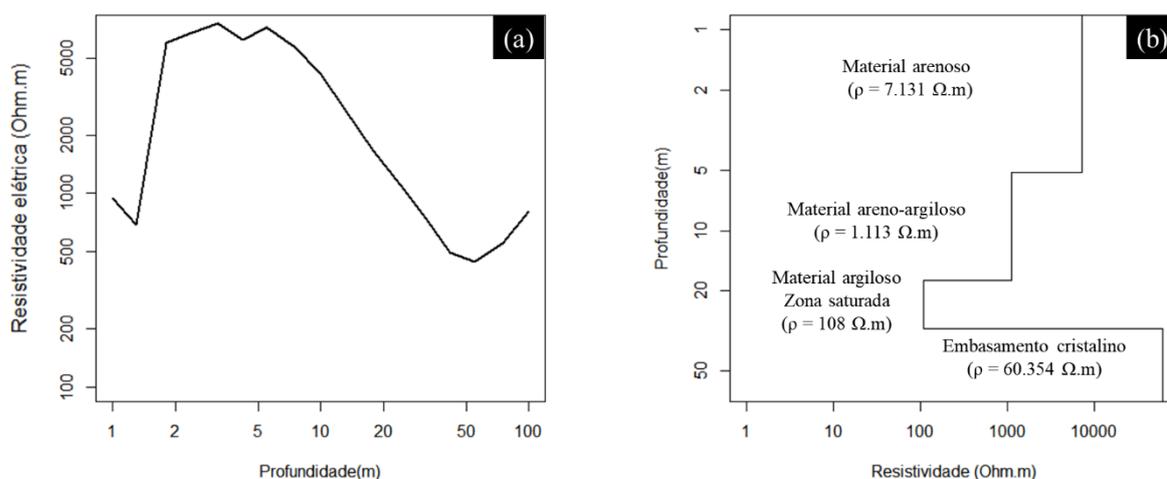


Fonte: Próprio autor (2020).

4.3.2.1 Padrão Geoelétrico 1 (SEV 2)

O padrão é constituído somente por uma sondagem, SEV 2 (Figura 63a), alcançando 100 metros de profundidade (tipo KA, conforme o método comparativo de Braga (2006)), estando localizada na porção noroeste do terreno, local onde fora construído o aterro sanitário do município de Normandia. Esse posicionamento implica possivelmente em rara ou nenhuma interferência da contaminação advinda dos resíduos alocados, ou seja, os valores de resistividades estariam associados a litologia pertinente a área. A figura 64a a seguir retrata a curva de resistividade aparente e seu perfil elétrico em profundidade (64b). Na figura 64c podemos observar a litologia arenosa superficial para área, visto que, esse material é transportado pela planície de inundação do igarapé Pau Grande.

Figura 64 – Configuração da Sondagem Elétrica Vertical 2 (SEV 2) (Normandia/RR). (a) Curva de resistividade aparente, (b) Interpretação das camadas, por meio do processo de inversão, com o *IPI2WIN*. (c) Foto da coleta da SEV 2 em via próxima a área de despejo de resíduos.



Fonte: Próprio autor (2020).

O processo de inversão foi efetuado com minimização de erros com quatro camadas (erro de 7,21%, ver figura 64b). A primeira camada fora associada ao material arenoso, fato este observado visualmente conforme a figura 64c, denotando assim, alta porosidade para o meio, visto que, o meio geológico vigente para a área é de cobertura sedimentar (Formação Boa Vista). Os valores de resistividade atingem 5.721 Ω .m na curva de campo e 7.131 Ω .m na interpretação do processo de inversão, perfazendo uma espessura de 5,15 m, corroborando o caráter arenoso das camadas superficiais (BORTOLIN; FILHO, 2012; SOUZA; CARVALHO, 2017).

Na segunda camada o comportamento muda ao se considerar os valores de resistividade aparente a partir dos 5,5 m de profundidade, que apresentam comportamento decrescente até os 55 m (7.205,8 Ω .m), sugerindo aumento do teor argiloso e, conseqüentemente de umidade do meio geológico (Figura 64b). O processo de inversão indica a presença de camada areno-argilosa entre as profundidades de 5,15 e 17,6 m, com presença de franja capilar (proximidade com o nível d'água), evidenciado pelo decréscimo da resistividade aparente (BRAGA, 2016).

A terceira camada sugere a presença de material argiloso que se localiza entre as profundidades de 17,6 e 30,9 m, com resistividade de 108 Ω .m (Figura 64b). Interpretações realizadas por Braga (2016) e Santos Filho et al. (2017) apontam que zonas com queda acentuada de resistividade podem apresentar forte teor argiloso, com alta saturação.

Por fim, a quarta camada apresenta valor de resistividade teórica de 60.354 Ω .m e valores nessa ordem são associados a zonas que podem corresponder ao embasamento (topo rochoso) na profundidade de 30,9 m (Figura 64b). Por meio de dados de poços do SIAGAS (2020) próximos da área de estudo, é possível que essa camada corresponda ao embasamento cristalino (Suíte Metamórfica Saracura) abaixo da cobertura sedimentar (Formação Boa Vista).

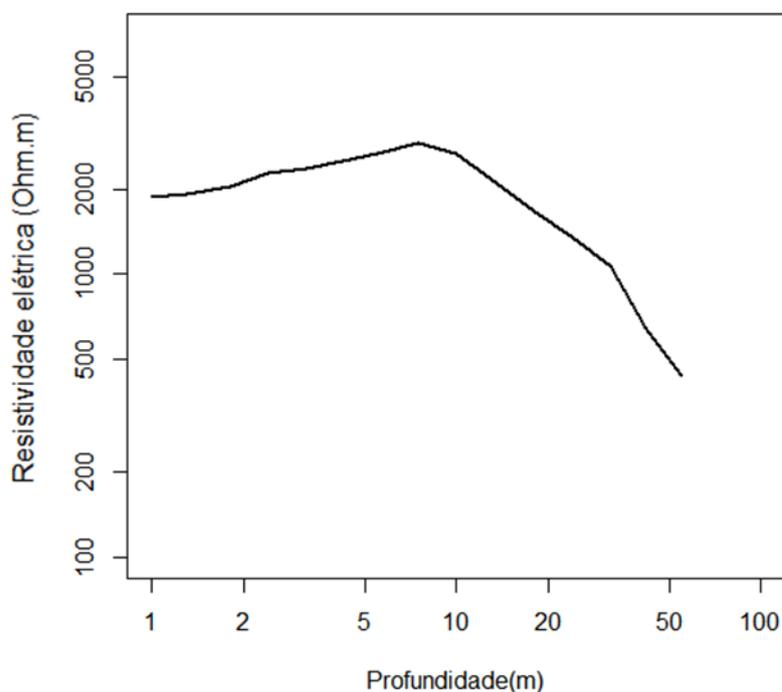
4.3.2.1 Padrão Geométrico 2 (SEV 1)

A SEV 1 alcançou profundidade 55 metros (tipo K, conforme o método comparativo de Braga (2006)), sendo executada sobre a pilha de resíduos 2, onde há a alocação dos resíduos pelo caminhão de coleta (Figura 63a). A figura 65 apresenta a curva de resistividade aparente, configurando o perfil elétrico em profundidade. De forma holística, a curva pode ser dividida em duas fases principais: suavemente ascendente (1,0-7,5 m) e decrescente (7,5-55 m) de profundidade.

O aspecto suavemente ascendente da primeira fase da curva ($1.865,3 < \rho_a < 2.894,0 \Omega.m$) indicam caráter arenoso, que, aparentemente não parecem ter influência dos resíduos dispostos nessa porção, mas como o levantamento é realizado no período seco, i. e., o solo seco dificulta a passagem de corrente elétrica, aumentando a resistividade, e a interpretação da SEV 2 já corrobora que as camadas superficiais são altamente porosas, os materiais condutivos podem ter sido transportados pelos poros em subsuperfície e sendo dispersos lateralmente ou retidos em camadas mais argilosas (Figura 65).

A segunda fase da curva é marcada pelo comportamento decrescente, indicando aumento gradual de umidade associado ao contato com materiais argilosos (BRAGA, 2016; SOUZA; ANDRADE; MORAES, 2018). Desta forma, a água que infiltra pela camada arenosa imediatamente acima começa a ter seu fluxo desacelerado, sendo parcialmente absorvida pelas partículas de argila, que contém forças elétricas desbalanceadas (DAS, 2019), os materiais lixiviados da pilha de resíduos podem ficar retidos nessas camadas, o que explica os valores de resistividade aparente decrescendo abruptamente, principalmente a partir dos 32 m aos 55 m de profundidade ($1.062,8 > \rho_a > 437,2 \Omega.m$) (Figura 65).

Figura 65 – Curva de resistividade aparente da SEV 1 (Normandia/RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

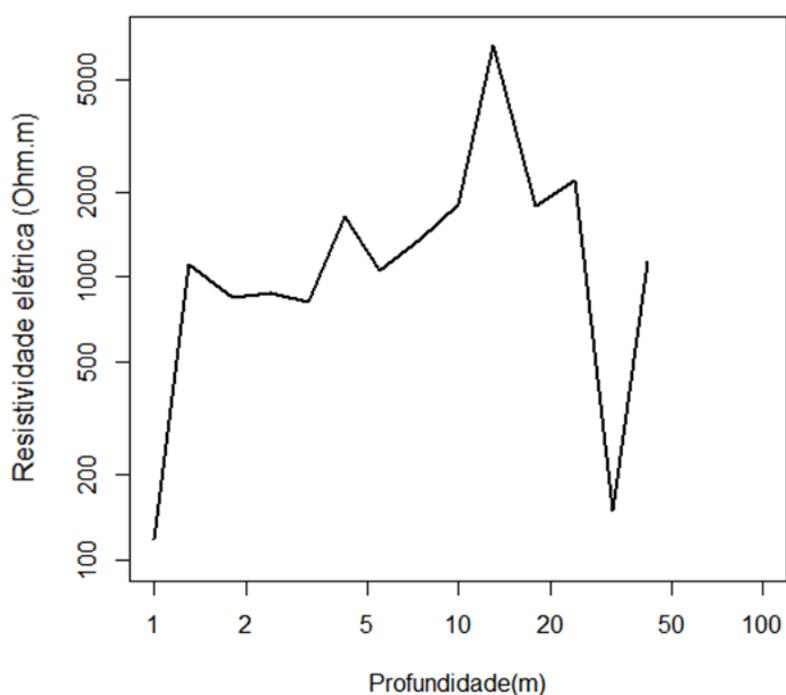
4.3.2.3 Padrão Geométrico 3 (SEV 3)

A presente sondagem alcançou profundidade de 42 metros (tipo AHQ, conforme o método comparativo de Braga (2006)), sendo prospectada na porção frontal à pilha de resíduos 1 (Figura 63a). A SEV 3 (Figura 66) apresenta comportamento elétrico com variações abruptas de resistividade em diversas profundidades.

Inicialmente, há abrupto acréscimo de resistividade entre 1,0 e 1,3 m ($118,0 < \rho_a < 1.100,8 \Omega.m$), mantendo-se na faixa de $850 \Omega.m$ até a profundidade de 3,2 m, apresentando fortes convexidades entre 3,2-5,5 m ($819,0 < \rho_a < 1.646,0 \Omega.m$) e 10-18 m ($1.783,5 < \rho_a < 6.585,0 \Omega.m$) (Figura 66). Essas acentuadas variações de resistividade podem indicar a presença de camadas com alta porosidade.

Dos 24 a 32 m de profundidade, nota-se queda acentuada dos valores de resistividade ($2.207,1 > \rho_a > 149,3 \Omega.m$), assemelhando-se ao comportamento das SEV 1 e 2 (consideradas nos itens 4.3.2.1 e 4.3.2.2), contudo, atingindo valores bem inferiores, configurando-se como zona altamente condutiva, podendo evidenciar presença de íons metálicos (BORTOLIN; FILHO, 2012; BRAGA, 2016). Aos 42 m de profundidade, o valor de resistividade aparente se estabiliza em $1.128,2 \Omega.m$.

Figura 66 – Curva de resistividade aparente da SEV 3 (Normandia/RR).



Fonte: Próprio autor (2020).

4.3.2.4 Padrão Geométrico 4 (SEV 4 e 5)

O padrão em questão engloba duas sondagens de morfologia convexa (tipo AHK, conforme o método comparativo de Braga (2006)), ambas com profundidades de 55 metros. A SEV 4 foi realizada na pilha de resíduos 2 (porção norte) e a SEV 5 a leste da célula do aterro sanitário desativado (Figura 63a). As SEV 4 e 5 possuem aspectos gerais fortemente análogos com geometria convexa: (a) baixos valores de resistividade nas primeiras leituras, (b) comportamento predominantemente ascendente, com algumas oscilações, e (c) decréscimo a partir dos 18 metros de profundidade e de modo geral são convexas (Figura 67a).

As profundidades iniciais (1,0-5,5m) da SEV 5 apresentam aspecto ascendente, variando de 94,2 a 945,5 Ω .m. A SEV 4 também se mostra com o mesmo padrão, variando de 159,4 a 650,2 Ω .m entre as profundidades de 1,3 e 5,5 m. Os valores de resistividade supracitados, por se apresentarem consideravelmente inferiores dos considerados na interpretação do meio geológico, podem ser forte indicativo da influência de materiais condutivos (e. g. argilas) nas camadas consideradas, e o comportamento ascendente indica a atenuação de sua influência e equiparação com o meio geológico de referência (vide Figura 67b).

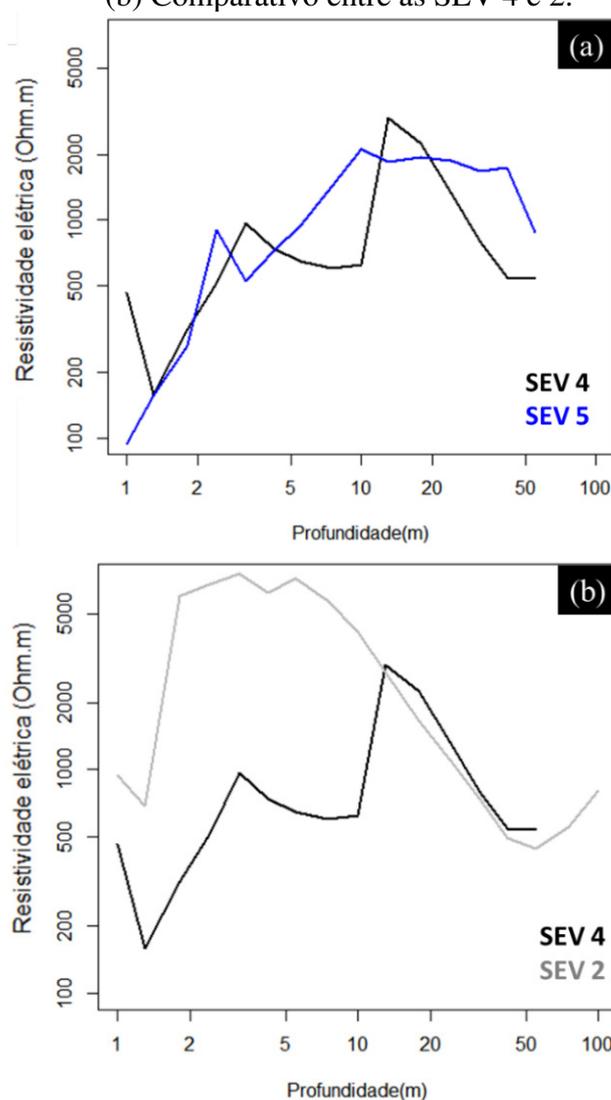
Posteriormente, nas zonas de 5,5-13 m de profundidade as curvas divergem. Enquanto, a curva da SEV 4 mantém aspecto ascendente (599,9 < ρ_a < 2.954,9 Ω .m) a SEV 5 tem aspecto descendente até os 10 m de profundidade e abruptamente ascendente até os 13 m (945,5 < ρ_a < 2,122,2 Ω .m).

Os valores de resistividade das camadas iniciais variam da ordem de 100 Ω .m e atingem valores acima de 1.000 Ω .m em profundidade, o que sugere que nos pontos analisados com esse padrão geométrico há resquícios de materiais condutivos nas primeiras camadas, e essa abrupta oscilação pode ser interpretada como uma anomalia condutiva, visto que, conforme considerado no Padrão Geométrico 1, os horizontes mais superficiais são arenosos, isto é, espera-se que nestes, encontre-se valores de resistividade maiores do que nas camadas mais profundas, com teor areno-argiloso e aumento gradual de umidade.

Deve-se considerar que o solo empregado como material de aterro no aterro sanitário (solo arenoso vermelho com alto teor de concreções lateríticas, ver a superfície do terreno da figura 56), por ser mais porosa, favoreceu um caminho preferencial para a água de infiltração das áreas adjacentes, isto justifica os baixos valores de resistividade nas camadas iniciais da SEV 5, mesmo considerando o teor arenoso do meio, sustentando a hipótese que todo o lixiviado produzido por diluição migra para a área em que o aterro está construído.

Certa similaridade pode ser visualizada entre as SEV 2 e 4 a partir dos 13 m de profundidade, o que, de acordo com Braga (2016) o comportamento fortemente descendente indica presença de materiais mais argilosos e, conseqüentemente, aumento de saturação. O aspecto areno-argiloso das camadas entre as profundidades de 5,15 m e 17,5 m (interpretação realizada na seção 4.3.2.1) favorecem a retenção de umidade das camadas superficiais e, por isso, nota-se que, ao considerar que a SEV 4 foi realizada ao lado da pilha de resíduos e que a SEV 2 foi realizada afastada da área de disposição final, percebe-se que a influência dos resíduos (percebida pelos valores baixos de resistividade) é marcante apenas até a profundidade de 13 m, pois o material areno-argiloso funciona como trapa natural para o lixiviado (Figura 67b).

Figura 67 – Curvas de resistividade elétrica do Normandia/RR. (a) SEV 4 e 5. (b) Comparativo entre as SEV 4 e 2.



Fonte: Próprio autor (2020).

4.4 MODELAGEM GEOFÍSICA

A partir do levantamento eletrorresistivo realizado e apresentado nas seções 4.1.2, 4.2.2 e 4.2.3 e interpretação dos dados em função da pedologia, geologia e morfometria, é possível realizar a composição da assinatura geofísica das três áreas consideradas até aqui. Esta composição performa um modelo hipotético de contaminação para as três áreas estudadas, em forma de isópacas, que apresentam a distribuição lateral dos valores de resistividade aparentes coletados em campo, assim como as apresentadas por Souza e Andrade (2018), Souza, Andrade e Moraes (2018), Souza e Carvalho (2017) e Xavier et al. (2017).

A partir da amplitude dos valores de resistividade aparente e das características do meio geológico, categorizou-se as zonas em condutivas ($\rho_a \leq 700 \Omega.m$), que podem estar associados a materiais puramente argilosos ou contaminados ver Silva et al (2018).

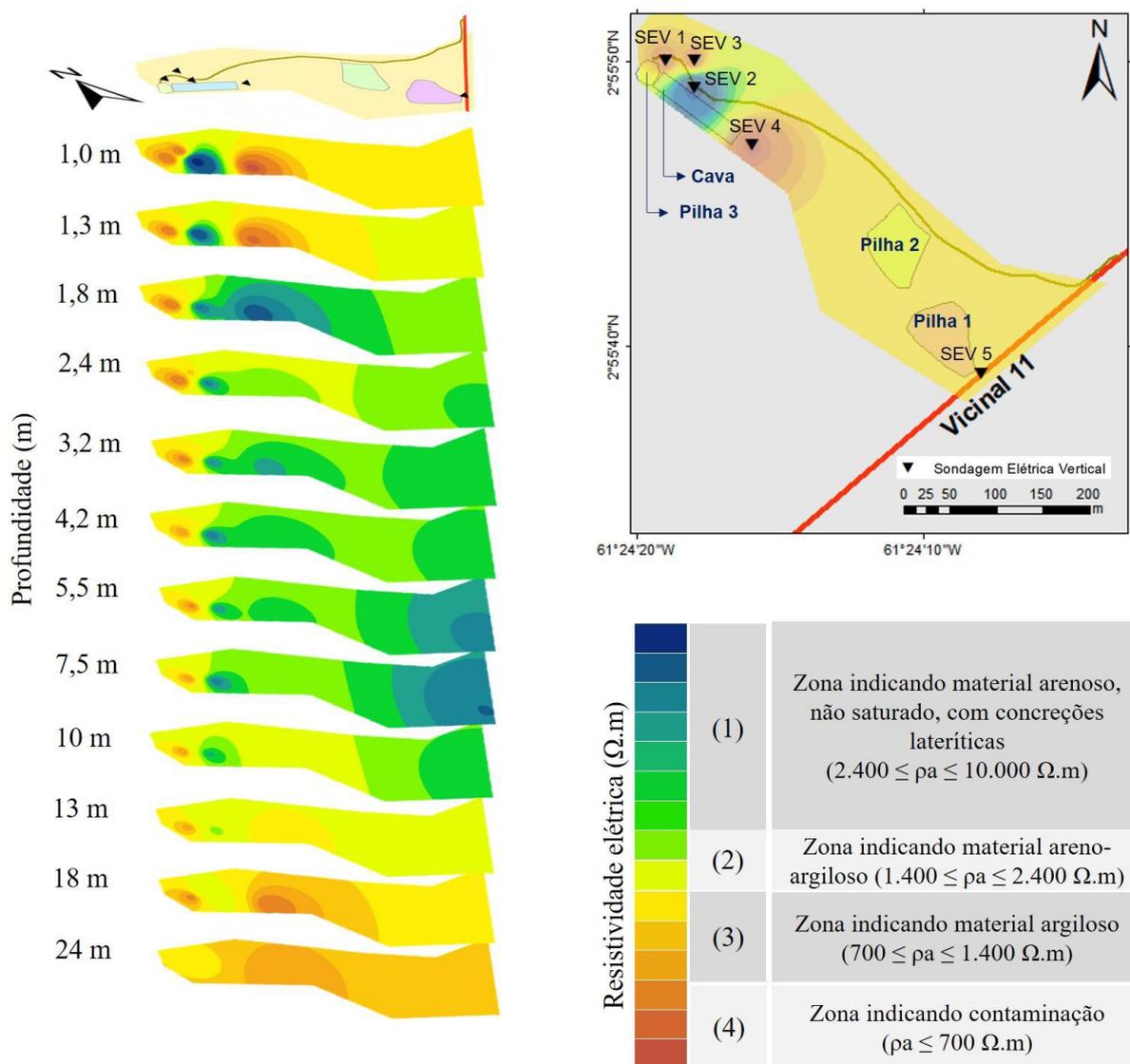
Outra categoria consiste em zonas resistivas ($2.400 \leq \rho_a \leq 10.000 \Omega.m$), que podem estar associadas a materiais arenosos e presença de resíduos de concreções lateríticas, conforme afirmado por Souza, Andrade e Moraes (2018) e Souza e Andrade (2018). Dentre as classificações já mencionadas, distinguiu-se também zonas argilosas ($700 \leq \rho_a \leq 1.400 \Omega.m$) e areno-argilosas ($1.400 \leq \rho_a \leq 2.400 \Omega.m$), correlacionando o teor argiloso e arenoso às ordens de valores de resistividade conforme Moreira et al. 2013 e Souza e Andrade (2018).

As classificações supracitadas permitem a interpretar a configuração hipotética do fluxo do contaminante nas áreas em questão. A seguir, apresenta-se as isópacas, respectivamente, das áreas de disposição de resíduos sólidos dos municípios de Alto Alegre, Cantá e Normandia, bem com as devidas interpretações em combinação o levantamento morfométrico e eletrorresistivo de cada área.

4.4.1 Alto Alegre

As isópacas da área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre (Figura 68) estão apresentadas em 12 níveis de investigação (1,0 m a 24,0 m de profundidade). O formato de apresentação fora recortado de acordo com a poligonal que contorna a área, para minimizar os efeitos de borda (prolongamento excessivo de valores interpolados não representativos) que podem apresentar os processos de interpolação, conforme explicado por Silva et al. (2020) na elaboração de um mapa de isópacas para precipitação em Roraima.

Figura 68 – Modelo hipotético da contaminação em forma de isópacas para a área de disposição de resíduos sólidos do município de Alto Alegre/RR. A representação em planta indica a localização das SEV e a isópaca no primeiro nível de investigação (1,0 m).



Fonte: Próprio autor (2020).

Predominantemente, nos níveis intermediários (1,8-10 m de profundidade) percebe-se aspecto predominantemente arenoso a areno-argiloso à medida que se avança em profundidade tendo valores de resistividade aparente entre $1.400 \leq \rho_a \leq 5.721 \Omega.m$, este comportamento não é observado sob a SEV 1 e, visto que os valores baixos característicos desta SEV se concentra apenas nesta, observa-se um comportamento de migração vertical gravitacional do chorume, comportamento similar ao analisado no Aterro Sanitário do município de Leme (SP) por Moreira et al. (2013), em que não se observa espreadimento lateral do chorume.

Os valores de resistividade são mais baixos nos primeiros níveis de investigação, sendo que apenas o ponto em que se localiza a pilha de resíduos 3 (onde foi realizada a SEV 1) há baixos valores de resistividade se prolongando até a profundidade de 18 m, se espraiando lateralmente, sustentando a hipótese de uma zona argilosa, que pode funcionar como uma trapa natural para o chorume. Esta configuração foi percebida no lixão do município de Boa Vista, no estudo de Souza e Andrade (2018).

4.4.2 Cantá

A área de disposição de resíduos sólidos do município de Cantá é apresentada em 13 níveis de investigação (Figura 69) e os valores de resistividade mais baixos ($\rho_a \leq 700 \Omega.m$) se concentram nos primeiros níveis de investigação (até os 2,4 m de profundidade) se espraiando lateralmente, o que corrobora o teor argiloso dos primeiros horizontes da área. Os valores mais baixos encontrados se concentram na SEV 1, que foi realizada dentro da cava de disposição de resíduos sólidos.

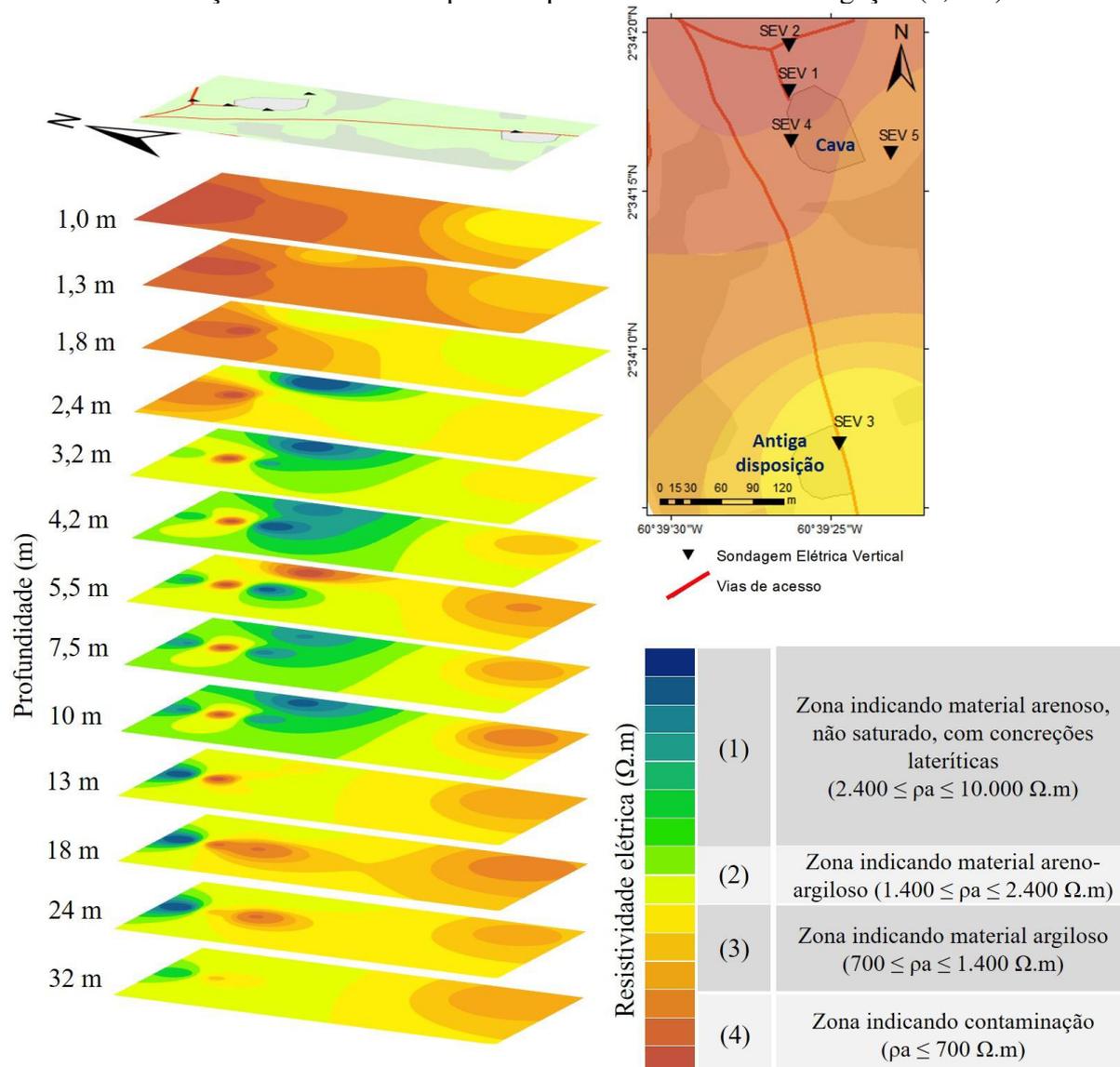
Ao contrário do observado para o município de Alto Alegre, os horizontes se tornam mais arenosos em profundidade, o que confere o espraiamento do chorume nos primeiros níveis, mas que, nos posteriores, observa-se uma migração mais pontual, isto é, os valores baixos de resistividade migram na direção NW-SE de forma pontual e lateralizada (ver os níveis 3,2-5,5 m na figura 69) em direção ao antigo “lixão” e ao rio Quitauaú e migrando verticalmente até as leituras de 18 m de profundidade, não sendo mais pronunciáveis a partir dos 32 m, em que se encontra uma camada mais argilosa.

Vale destacar que nas sondagens realizadas no entorno da atual cava de disposição (SEV 1, 2, 4), há concentração de valores de resistividade aparente baixos nos horizontes iniciais, e, em contrapartida, na SEV 3, que foi realizada em frente ao antigo “lixão”, encontra-se valores condutivos ($\rho_a \leq 700 \Omega.m$) entre os níveis 5,5-18 m de profundidade, que podem estar associados a migração vertical e gradativa de contaminantes ao longo do tempo, conforme observado por Bortolin e Malagutti Filho (2010) no aterro controlado de Rio Claro, SP.

Outra hipótese é que há a migração lateral e pontual na direção N-S do lixiviado proveniente da atual cava de disposição de resíduos sólidos, por influência dos aspectos topográficos (as partes que se aproximam do rio Quitauaú são mais baixas, ver figura 47) favorecendo o transporte de chorume na referida direção. A influência do fator topográfico foi observada por Souza e Andrade no lixão de Boa Vista e por Bichet, Grisey e Aleya (2016) no

aterro sanitário de Belfort (França), em que constataram que as zonas mais baixas se configuram como regiões de mineralização do chorume.

Figura 69 – Modelo hipotético da contaminação em forma de isópacas para a área de disposição de resíduos sólidos do município de Cantá/RR. A representação em planta indica a localização das SEV e a isópaca no primeiro nível de investigação (1,0 m).



Fonte: Próprio autor (2020).

4.4.3 Normandia

A área de disposição de resíduos sólidos de Normandia é apresentada em 15 níveis de investigação (Figura 70) e, de forma análoga como foi observado no município de Cantá, as zonas condutivas se concentram nos primeiros níveis de investigação (até os 1,8 m de profundidade) se espalhando-se lateralmente, em que, apesar de apresentar um meio geológico mais arenoso, possui nível freático raso e o planossolo se caracteriza como superficial e mal drenado (SANTOS et al., 2018), o que favorece o processo de diluição e espalhamento do chorume, que alcançou, inclusive o perímetro do aterro sanitário desativado.

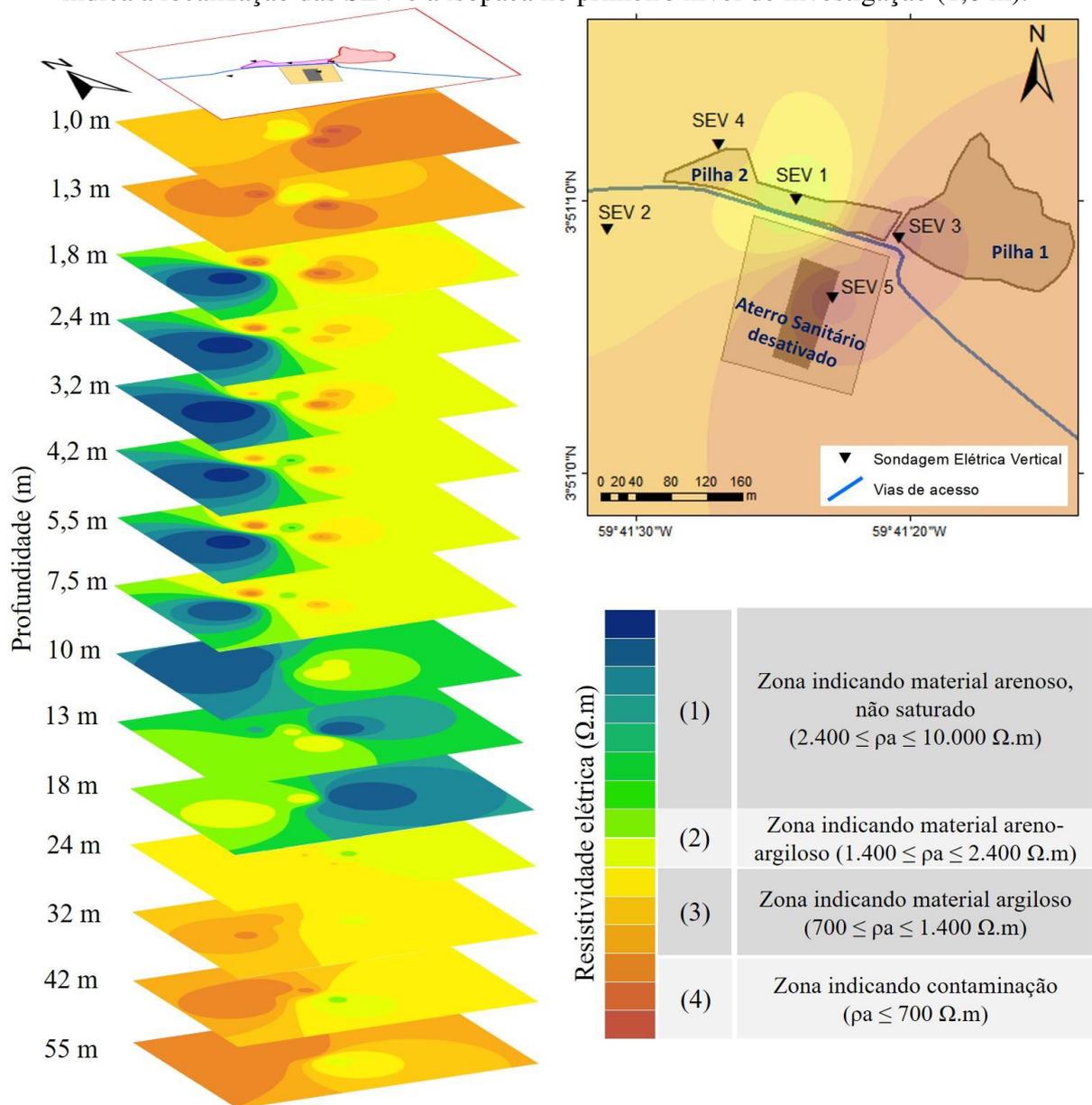
A partir dos 2,4 m de profundidade, observa-se um afinamento dos contaminantes, percolando verticalmente até os 7,5 m, o que evidencia a predominância da influência gravitacional na percolação do chorume, assim como observado no município de Alto Alegre e observado por Souza, Andrade e Moraes (2018) no lixão do município de Caracará, em que se teve uma configuração de transporte vertical do lixiviado.

Dos 10-18 m nota-se a predominância de teor puramente arenoso, o que não significa, necessariamente, que não há mais resquícios de contaminação, mas que, por ser uma zona, hipoteticamente, mais porosa, o material lixiviado pode ser percolado com mais facilidade por estas profundidades buscando zonas mais argilosas para se concentrar e se espalhar lateralmente ou se acumular, formando uma pluma de contaminação, como explicado por Moreira e Braga (2009).

A partir dos 24 m aos 55 m de profundidade predomina-se valores de resistividade aparente variando entre 700 Ω .m e 2.400 Ω .m, o que sugere que esses níveis possuem caráter argiloso, mas que há a presença de valores inferiores a 700 Ω .m na porção NW, o que sugere uma possível percolação do chorume em direção ao Igarapé Pau Grande (ver figura 59).

De maneira geral, os modelos mostrados das três áreas estudadas demonstram-se como resquícios de contaminação que migram de forma espalhada nos níveis iniciais e que nos níveis mais profundos percolam pontualmente e verticalmente, o que, paulatinamente pode atingir os corpos hídricos adjacentes, bem como também alterar os parâmetros de qualidade das águas subterrâneas, por meio do processo de diluição do chorume.

Figura 70 – Modelo hipotético da contaminação em forma de isópacas para a área de disposição de resíduos sólidos do município de Normandia/RR. A representação em planta indica a localização das SEV e a isópaca no primeiro nível de investigação (1,0 m).



Fonte: Próprio autor (2020).

CONCLUSÕES

Diante dos levantamentos geofísicos e morfométricos realizados nos municípios de Alto Alegre, Cantá e Normandia (porção norte do estado de Roraima), tem-se o panorama da disposição de resíduos sólidos das referidas áreas por intermédio de ferramentas indiretas de baixo custo e excelente eficácia, quando se compara com outras metodologias invasivas com a mesma finalidade.

Num primeiro momento, considerou-se que todas as áreas estudadas se enquadram como lixões a céu aberto, com base nos princípios que a literatura científica e as prescrições normativas, exaustivamente, nos últimos anos ressaltam, bem como também as consequências da má disposição desses resíduos sólidos, que poderiam ser geridos de forma a gerar empregos, energia elétrica, bem como outros benefícios possíveis.

A caracterização morfométrica permitiu compreender como é a dinâmica das bacias hidrográficas no entorno das áreas de disposição de resíduos, bem como elencar os parâmetros que contribuem para a percolação do chorume no meio geológico, e inferir o provável sentido dos contaminantes em superfície e em subsuperfície.

O ensaio eletrorresistivo, com sondagens elétricas verticais pelo arranjo *Schlumberger* permitiram caracterizar e identificar – em função da profundidade e resistividade – diferentes estratos geoeletricos, associando-os com as informações da pedologia, geologia e hidrogeologia local. Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que por meio da interpretação mostraram-se eficientes para identificar zonas potencialmente contaminadas.

A área do município de Alto Alegre, que se configura como um lixão, está em uma região arenosa, com alta permeabilidade e com predominância de vertentes que propiciam a absorção de umidade, com a presença de aquíferos fissurais esparsos, que propiciam a rápida percolação do fluxo contaminador no sentido do Igarapé Comissão. Vale ressaltar que, por haver várias propriedades rurais no entorno, a falta de cobertura do material disposto, bem como a falta de proteção do solo, as águas subterrâneas, que, conforme o levantamento geoeletrico realizado, podem estar potencialmente contaminadas pela cava de disposição de resíduos do local, com sentido de percolação vertical e se espraiando no nível freático e sendo trapeados por uma zona argilosa, não se detectando indícios aos 24 metros da investigação.

A área do município de Cantá, que também se caracteriza como um lixão, além de estar em uma área arenosa, se situa num raio muito próximo (< 250 m) a propriedades rurais que utilizam águas de poços, situada em uma antiga jazida de concreções lateríticas. A caracterização morfométrica evidencia que o fluxo contaminador tem a tendência de migrar no

sentido do Rio Quitauaú, ainda que a cava se situe mais próxima ao Igarapé Grande, levando em consideração a altimetria e declividade da bacia. O levantamento elétrico corroborou as informações inferidas pela morfometria e detectou valores altamente condutivos até os 10 metros de profundidade, que se espriam lateralmente no sentido do antigo lixão formando uma pluma que migra até os 18 metros de profundidade.

O município de Normandia, que mesmo contando com um aterro sanitário construído, enquadra-se em situação similar, visto que este encontra-se desativado, tendo seus resíduos dispostos em formato de lixão a céu aberto. Ainda que este, em relação às outras áreas estudadas, esteja estrategicamente posicionado distante de corpos hídricos e propriedades rurais, este está assentado numa cobertura sedimentar arenosa, que há uma alta vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas, além de ser uma área inundável, que propicia a diluição dos contaminantes em superfície, podendo atingir os igarapés e lagos presentes na bacia delimitada no levantamento morfométrico. O levantamento eletrorresistivo indicou contaminação pronunciável e espriada lateralmente até os 2,4 metros de profundidade, que inclui a área do aterro sanitário desativado, visto que o material geotécnico de composição dos horizontes superficiais deste é mais poroso que o planossolo característico da região, que posteriormente percola verticalmente e se espria lateralmente em zonas saturadas e porosas próximas ao embasamento cristalino.

Em suma, as três áreas necessitam de uma adequação quanto às normas vigentes na legislação brasileira para que, no médio e longo prazo ou efeitos causados pela má disposição de resíduos sólidos sejam mitigados. Essas medidas podem incluir a elaboração de um aterro sanitário de pequeno porte, visto que a produção diária de resíduos sólidos é inferior a 20 toneladas por dia (ABNT, 2010).

Além disso, mesmo que as áreas fossem desativadas no curto prazo, estudos de monitoramento ainda teriam que ser realizados, visto que propriedades rurais vizinhas utilizam águas de poços e o processo de atenuação natural é gradativo, podendo levar anos para mitigar suas implicações nos parâmetros de potabilidade das águas subterrâneas.

Tendo em vista a eficiência dos métodos empregados nesta pesquisa, sugere-se sua aplicabilidade em outras áreas contaminadas pertencentes a outros municípios que se enquadram na mesma realidade. Além disso, no que diz respeito à área de estudo, para trabalhos futuros propõe-se: análise da qualidade da água dos corpos hídricos a montante e jusante dos lixões; caracterização dos elementos químicos presentes em subsuperfície; levantamento de impacto ambiental de cada área; determinação de outros locais dentro de cada município estudado que sejam apropriados para a concepção de um aterro sanitário.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. [S. l], v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

AMARAL, D. G. P.; LANA, C. E. Uso de geoprocessamento para indicação de áreas favoráveis à construção de aterro sanitário no município de Ouro Preto (MG). **Caderno de Geografia**. Belo Horizonte, v. 27, n. 49, p. 368-382, 2017.

ASSIS BRASIL, L.; PIRES, B. H.; HAYD, R. L. N. A realidade do aterro sanitário de Boa Vista: relato de experiência. **Mens Agitat**. Boa Vista, v. 14, n. 1, p. 15-19, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13895**: Construção de poços de monitoramento e amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 1997a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15849**: Aterros sanitários de pequeno porte: diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BARBOSA, G. V. Geomorfologia. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. **Folha NA.20 Boa Vista e parte das folhas NA.21 Tumucumaque, NB.20 Roraima e NB.21**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1975.

BARBOSA, R. I.; BACELAR-LIMA, C. G. Notas sobre a diversidade de plantas e fitofisionomias em Roraima através do banco de dados do herbário INPA. **Amazônia: Ci. & Desenv.** Belém, v. 4, n. 7, 2008.

BARBOSA, R. I.; CAMPOS, C. Detection and geographical distribution of clearing areas in the savannas ('lavrado') of Roraima using Google Earth web tool. **Journal of Geography and Regional Planning**. [S. l.], v. 4, n. 3, p. 122-136, 2011

BICHET, V.; GRISEY, E.; ALEYA, L. Spatial characterization of leachate plume using electrical resistivity tomography in a landfill composed of old and new cells (Belfort, France). **Engineering Geology**. Paris, v. 211, p. 61-73, 2016.

BOKHONOK, O. et al. Utilização de uma metodologia inovadora para interpretação de dados de sondagem elétrica vertical (SEV) visando investigação profunda na Bacia do Paraná, porção oeste do Estado de São Paulo. Fifteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 31 de julho a 3 de Agosto de 2017. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica, 2017.

BORTOLIN, J.R.M. **Monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP) por meio do método da eletrorresistividade**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2009.

BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 15, n. 4, p. 367-374, out./dez. 2010.

BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUTTI FILHO, W. Monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro de resíduos urbanos de Rio Claro (SP) por meio do método geofísico da eletrorresistividade. **Geologia USP Série Científica**. São Paulo, v. 12, n. 3, p. 99-113, 2012.

BOSCOV, M. E. V. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

BRAGA, A. C. O. **Geofísica Aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática**. 2006. 121 p. Tese (Livre – Docência). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2006.

BRASIL. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017-2018**. São Paulo: ABRELPE, 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 03 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Altera a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 16 jul. 2020.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 4. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2015b.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 2289 de 8 de julho de 2015**. Prorroga o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, Brasília, 8 jul. 2015a.

CAMARGO, D. A.; HERMANY, R. Migração venezuelana e poder local em Roraima. **Revista de Estudos Jurídicos UNESP**. Franca, v. 22, n. 35, p. 229-251, 2018.

CANATA, R. E. et al. Integração dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético Aterro Sanitário de Guaratuba-PR. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba, v. 74, n. 1, p. 11-27, 2018.

CARVALHO, T. M. **Caracterização Hidrogeomorfológica da Bacia Hidrográfica do Rio Branco, Estado de Roraima, Brasil**. 2018. 166 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

CARVALHO, T. M. Sistemas e ambientes denudacionais e agradacionais, uma primeira aproximação para o estado de Roraima, norte da Amazônia. **ACTA Geográfica**. Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 77-98, 2014.

CARVALHO T. M.; CARVALHO, C. M.; MORAIS, R. P. Fisiografia da Paisagem e Aspectos Biogeomorfológicos do Lavrado, Roraima, Brasil. **Rev. Bras. Geomorfol**. São Paulo, v.17, n. 1, p. 93-107, 2016

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

COKER, A. O. et al. Solid Waste Management Practices at a Private institution of Higher Learning in Nigeria. **Procedia Environmental Sciences**. [S. l.], v. 35, n. 1, p. 28-39, 2016.

COSTA, S.S. **Delimitação do arcabouço tectônico do cinturão Guiana Central, Estado de Roraima, com base na análise integrada dos dados geofísicos, geológicos, isotópicos e imagens de satélite.** 2005. 163 f. Tese (Doutorado em Geociências). Unicamp, Campinas, 2005.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Carta Hidrogeológica.** Folha NA-20. Brasília, 2016a. Escala 1:1.000.000.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Carta Hidrogeológica.** Folha NA-21. Brasília, 2016b. Escala 1:1.000.000.

CRUZ, A. et al. Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Caculuvar (Angola). In: 8º Congresso Nacional de Geomorfologia, 4-7 de outubro de 2017. **Anais...** Porto: Faculdade de Letras da Universidade do Porto, 2017.

DAMASCENO, O. I. C. et al. Avaliação do potencial de contaminação ambiental do solo pelo lixo eletrônico. In: 54º Congresso Brasileiro de Química, 3-7 novembro de 2014. **Anais...** Natal: ABQ, 2014.

DAS, M. B. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Cengage do Brasil, 2019.

DEFFONTAINES, B.; CHOROWICZ, J. Principles of drainage basin analysis from multisource data: application to the structural analysis of the Zaire Basin. **Tectonophysics.** Paris, v. 194, n. 3, p. 237-263, 1991.

DONATO, F. T. **Caracterização geométrica de subsuperfície através do método da eletrorresistividade do cemitério de Monte Alto (SP).** 2019. 107 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2019.

DUDA, R. et al Investigating the Pollution Range in Groundwater in the Vicinity of a Tailings Disposal Site with Vertical Electrical Soundings. **Pol. J. Environ. Stud.** [S. l.], v. 29, n. 1, p. 101-110, 2020.

FRANCESCHI, F. R. A. et al. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: uma discussão sobre a evolução dos dados no período 2003-2014. **Revista DAE.** São Paulo, v. 206, n. 2, p. 62-68, 2017.

GOES, D. A. Contribuição Do Aterro Sanitário Na Gestão De Resíduos Sólidos: Um breve estudo de caso no aterro de Paulo Afonso, BA. **Revista Científica da FASETE.** Paulo Afonso, v. 7, p. 90-105, dez. 2016.

GOMES, J. L. S. et al. Sondagem Elétrica Vertical aplicada aos estudos para implantação de barragens subterrâneas no município de Jenipapo de Minas. In: VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, 25 a 27 de outubro de 2016. **Anais...** Ouro Preto: SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica, 2016.

GOMES, M. G. S.; SILVA FILHO, P. A. Diagnósticos dos resíduos sólidos do estado de Roraima visando a potencialidade para a reciclagem e o grau de impactos gerados. In: XIX Encontro do Programa de Iniciação Científica. 3 a 7 de agosto de 2020. **Anais...** Boa Vista, Universidade Federal de Roraima, 2020.

GONÇALVES, L. C.; OLIVA, P. C. Estudo dos impactos ambientais ocasionados pelo cemitério municipal de Mocajuba (Pará, Brasil). **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 5, n. 9, p. 13650-13672, set. 2019.

HARE, P. W.; GARDNER, I. W. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins. Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: MORISAWA, M.; HACK, J. T. (Eds.). Tectonic geomorphology. Boston: Proceedings 15. **Anais...** Annual Binghamton Geomorphology Symposium. Allen and Unwin, 1985.

HOWARD, A. D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**. Tulsa, v. 51, n. 11, p. 2246-2259, 1967.

IBGE. **Estado de Roraima: Geologia**. 2005a. Escala 1:1.000.000.

IBGE. **Estado de Roraima: Pedologia**. Mapa de solos em nível exploratório. 2005b. Escala 1:1.000.000.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KOTTEK, M. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **MeteorologischeZeitschrift**. Stuttgart, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

LACERDA, H. C.; FONSECA, H. P.; FARIA, A. L. L. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Xopotó: utilizando imagens PALSAR e Sentinel-2. In: III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul, 27 a 29 de agosto de 2018. **Anais...** Juiz de Fora: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2018.

LADEIRA, L. F. B.; DANTAS, M. E. Compartimentação Geomorfológica. In: HOLANDA, J. L. R.; MARMOS, J. L. M; MAIA, M. A. M. (Org.). **Geodiversidade do estado de Roraima**. Manaus: CPRM, 2014.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia Geral**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2003.

LEMOS, C. E. F.; VIEIRA, M. I. S.; FERRAZ, R. R. Compartimentação hidrográfica da bacia de drenagem do Rio Branco, Estado de Roraima, Brasil por meio da Base Hidrográfica Ottocodificada. **ACTA Geográfica**. Boa Vista, v. 11, n. 26, p. 35-53, 2017.

LIMA, J. A. S. L. et al., 2016. **Roraima 2000-2013**. São Paulo: Editora Fundação Perseu Abramo, 2016.

LOPES, F. L. et al. Sondagem Elétrica Vertical no setor norte da Bacia do Pantanal: identificação de reativações cenozoicas de estruturas neoproterozoicas. In: VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, 18 a 20 de setembro de 2018. **Anais...** Salinópolis: SBF - Sociedade Brasileira de Geofísica, 2018.

LORANDI, R.; SANTOS, F. M.; LOLLO, J. A. Processo Investigativo do Potencial de Contaminação de Aquíferos por Atividades Antrópicas da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Pedras (SP). **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 12, n. 7, p. 2741-2751, 2019.

MANZANO, M. N. et al. Fragilidade a inundações da Bacia Hidrográfica do Rio Baquirivú-Guaçu (Guarulhos, SP). **Pesquisas em Geociências**. Porto Alegre, v. 46, n. 3, p. 1-12, 2019.

MAYLE, F. E.; POWER, M. J. Impact of a drier 520 Early-Mid-Holocene climate upon Amazonian forests. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**. [S. l.], v. 363, p. 1829-1838, 2008.

MENESES, M. E. N. S.; COSTA, M. L. Caracterização mineralógica e química dos regolitos de uma área de transição savana-floresta em Roraima: uma análise da evolução da paisagem. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 42, supl. 1, p. 42-56, 2012.

MENEZES, F. B. T. et al. Sistemas deposicionais fluviais: análise estratigráfica das unidades sedimentares da Formação Boa Vista, nordeste da Bacia do Tacutu, RR. **Revista Geográfica Acadêmica**. Boa Vista, v. 14, n. 1, p. 69-73, 2020.

MEPAIYEDA, S. et al. Contaminant Delineation of a Landfill Site Using Electrical Resistivity and Induced Polarization Methods in Alice, Eastern Cape, South Africa. **International Journal of Geophysics**. [S. l.], v. 2019, n. 1, p. 1-13, 2019.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Engenharia Sanitária Ambiental**. Rio de Janeiro, v.14, n. 2, p. 257-264, abr./jun. 2009.

MOREIRA, V. B.; PEREZ FILHO, A. Aplicação e correlação dos índices morfométricos fator de simetria topográfica transversa e fator de assimetria de bacia de drenagem em rios que drenam a chapada Uberlândia-Uberaba/MG. In: XII SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia, 24 a 30 de maio de 2018. **Anais...** UGB - União da Geomorfologia Brasileira, 2018.

MOREIRA, C. A. et al. Caracterização geofísica em aterro de resíduos sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica. **Geologia USP, Série Científica**. São Paulo, v. 13, n. 1, p. 2-34, 2013.

MOTTA, P. N. S. D. et al. Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Subaé, Bahia, Brasil. **Ambiência**. Guarapuava, v.13, n. 2, p. 470-485, 2017.

NIMER, E. Clima. In: **Geografia do Brasil: Região Norte**. Rio de Janeiro, IBGE, p. 61-71, 1991.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoeletrica em corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972.

OSCO, L. P. et al. Avaliação da Qualidade dos Solos nas proximidades do Aterro de Resíduos Sólidos em Pirapozinho, SP. **Anuário do Instituto de Geociências**. Rio de Janeiro, v. 41, n. 1, p. 203-211, 2018.

PINTO, V. M. et al. O contexto geológico no município de Boa Vista, Roraima, Brasil. **ACTA Geográfica**. Boa Vista, v. 6, n. 12, p. 7-19, 2012.

PIRES, D. M. B.; OLIVA, P. C. Avaliação da contaminação da subsuperfície de um lixão a céu aberto no município de Bragança (Pará, Brasil). **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 6, n. 1, p. 213-226, 2020.

PORCIÚNCULA, R. J.; LEAL, L. R. B. Geoelectric characterization for implantation a landfill in Simões Filho, Bahia, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**. [S. l.], v. 37, n. 4, p. 481-487, 2019.

RANGEL, R. C. et al. Electrical Resistivity Tomography and TDEM Applied to Hydrogeological Study in Taubaté Basin, Brazil. **International Journal of Geosciences**. [S. l.], v. 9, p. 119-130, 2018.

REIS, N.J.; FRAGA, L.M.B. **Geologia do Estado de Roraima**. Manaus: CPRM,1998.

REIS, N. J.; FRAGA, L. M. B.; ALMEIDA, M. E. Arcabouço Geológico. In: **Geodiversidade do Estado de Roraima**. Manaus: CPRM, 2014.

REIS, N. J. et al. Geologia do Estado De Roraima, Brasil. **Géologie de La France**. Orléans, v. 2, n. 3, p. 121-134, 2003.

REIS, N.J. et al. Orosirian calc-alkaline volcanism and the Orocaima Event in the Northern Amazon Craton. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v. 30, n. 3, p. 380-383, 2000.

REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. 3 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1982.

RIKILS, V. S. S. et al. Resíduos sólidos na Amazônia: um estudo de caso na Região Metropolitana do Sul do Estado de Roraima. **Espacios**. Caracas, v. 37, n. 19, p. 1-23, 2016.

RORAIMA. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento. **Inforaima 2020**. Disponível em: <<http://www.seplan.rr.gov.br/index.php>>. Acesso em 15 ago. 2020.

SANTOS, H. G et al. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018

SANTOS FILHO, M. G. et al. Solo e águas subterrâneas contaminadas pela deposição de resíduos sólidos urbanos: o caso do vazadouro de Tatuí (SP). **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, v. 38, n. 1, p. 31-47, 2017.

SCACABAROSSO, H.; PÉRICO, E. Perspectivas e Desafios da Coleta Seletiva na Cidade de Boa Vista - RR, no Contexto da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Federal nº 12.305/2010. **Geografia**. Londrina, v. 23, n. 2, p. 49-69, 2014.

SCHIAVINATO; V. M. S.; GONZALEZ, A. Z. D. Avaliação ambiental de nascentes na sub-bacia hidrográfica do córrego das Pitas-MT, Brasil. **Revista Equador**. Piauí, v. 8, n. 3, p.260-278, 2019.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações**. Ilhéus: Editus, 2002.

SCHAEFER, C. E. G. R. Ecogeography and human scenario in Northeast Roraima, Brazil. **Ci. Cult.**, v. 49, p. 241-252, 1997.

SIAGAS. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. Base de dados de poços, hidrogeologia e geologia. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

SILVA, A. C. F. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Terra Nova – PE. **Revista Semiárido De Visu**. Petrolina, v. 8, n. 1, p. 3-14, 2020.

SILVA, D. A. et al. Análise dos ciclos de precipitação na região de Boa Vista – RR nos anos de 1910 a 2014. **Revista Geográfica Acadêmica**. Boa Vista, v. 9, p. 35-49, 2015.

SILVA, D. et al. Análise da subsuperfície com sondagem elétrica vertical (SEV) nos municípios de Capanema e Primavera, nordeste do Estado do Pará. **Geociências**. São Paulo, v. 37, n. 2, p. 393-396, 2018.

SILVA, M. G.; PORSANI, M. J. Aplicação de balanceamento espectral e DMO no processamento sísmico da Bacia do Tacutu. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, v. 24, n.2, p. 273-290, 2006.

SOUZA, L. S. B. **Evidências tectônicas no leste da Ilha do Marajó: integração de dados morfoestruturais e geofísicos**. 2010. 202 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SOUZA, L. S. B.; ANDRADE, G. G. Resistividade no entorno do aterro sanitário municipal de Boa Vista, Roraima, Brasil: implicações ambientais. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Belém, v. 13, n. 3, p. 435-452, 2018.

SOUZA, L. S. B; ANDRADE, G. G.; MORAES, G. Um lixão sob o ponto de vista da geofísica rasa, município de Caracaraí, Roraima, Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**. Caicó, v. 4, n. 1, p. 21-41, 2018.

SOUZA, L. S. B.; CARVALHO, F. W. S. Contextualização geológica da porção sudoeste do Sistema Aquífero Boa Vista, estado de Roraima, Brasil, a partir de sondagens elétricas verticais rasas. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, Belém, v. 12, n. 1, p. 91-107, jan./abr. 2017.

SOUZA, V. B. **Determinação e avaliação de riscos de metais pesados no solo de um “lixão” desativado no município de Francisco Beltrão – Paraná.** 2019. 65f. (Mestrado em Engenharia Ambiental. Linha de pesquisa: Análise Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2019.

SOUZA, L. S. B.; ROSSETTI, D. F. Caracterização da rede de drenagem na porção leste da ilha de Marajó e implicações tectônicas. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** Brasília, v. 12, n. 1, p. 69-83, 2011.

SOUZA, L. S. B. et al. Neotectonics in Marajó island, state of Pará (Brazil) revealed by vertical electric sounding integrated with remote sensing and geological data. **An. Acad. Bras. Ciênc.** Rio de Janeiro, v. 85, n. 1, p. 73-86, 2013.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions American Geophysical Union.** [S. l.], v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Sedimentar e áreas afins.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

TAMUNO, W.; INICHINBIA, S. Vertical Electric Sounding of Leachate Contaminant Plumes at a Dumpsite in Obigbo, Rivers State, Nigeria. **J. Appl. Sci. Environ. Manage.** [S. l.], v. 23, n. 12, p.2245-2249, 2019.

TELFORD W. M.; GELDART L. P.; SHERIFF R. E. **Applied Geophysics.** Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WANKLER, F. L.; EVANGELISTA, R. A. O.; SANDER, C. Sistema Aquífero Boa Vista: “estado da arte” do conhecimento e perspectivas. **ACTA Geográfica.** Boa Vista, v. 6, n. 12, p. 21-39, 2012.

XAVIER, F. V. et al. Emprego da sondagem elétrica vertical integrada às análises químicas e microbiológicas no diagnóstico preliminar da contaminação do solo e da água subterrânea no cemitério municipal da cidade de Rio Claro (SP). **Engenharia Sanitária Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 333-344, mar. 2018.

YOUCAI, Z. **Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste**. Xangai: Butterworth-Heinemann, 2019.

ZAINI, M. S. I.; ISHAK, M. F.; ZOLKEPLI, M. F. Forensic assessment on landfills leachate through electrical resistivity imaging at Simpang Renggam in Johor, Malaysia. In. The 2nd International Conference on Green Civil and Environmental Engineering, Series: Materials Science and Engineering, 669. **Anais...** Malang: Universitas Negeri Malang, 2019.

APÊNDICE

Apêndice A – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 1 (Alto Alegre), realizada sobre a área de empilhamento de resíduos principal, direção NE-SW (2° 55' 50" N; 61° 24' 19" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			985,0	15,4	376,8			
2	1,3	10,23			703,0	15,8	455,0			
3	1,8	19,96			396,0	17,8	444,2			
4	2,4	35,80			310,0	23,5	472,2			
5	3,2	63,95			213,0	23,2	587,1			
6	4,2	110,44			13,7	2,1	720,5			
7	5,5	189,67	45,95		21,5	6,3	647,3	111,2	6,2	824,1
8	7,5	353,04	86,79		15,8	7,8	715,1	73,7	7,6	841,6
9	10	627,93	155,51		11,4	9,9	723,1	54,3	10,0	844,4
10	13	1061,47	263,89		3,5	4,8	774,0	18,4	5,0	971,1
11	18	2035,36	507,37		1,2	2,9	842,2	4,1	2,8	742,9

Apêndice B – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 2 (Alto Alegre), sobre o perfil da cava de disposição, à montante do escoamento superficial, direção NW-SE (2° 55' 49" N; 61° 24' 18" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			777,0	0,8	5721,1			
2	1,3	10,23			363,0	0,9	4124,4			
3	1,8	19,96			141,0	0,8	3518,8			
4	2,4	35,80			93,0	1,0	3329,3			
5	3,2	63,95			54,7	1,1	3179,9			
6	4,2	110,44			31,2	1,0	3445,8			
7	5,5	189,67	45,95		14,4	0,9	3034,8	18,6	0,9	949,5
8	7,5	353,04	86,79		6,7	0,7	3379,1	25,7	0,8	2788,0
9	10	627,93	155,51		4,1	0,9	2860,6	16,2	1,0	2519,2
10	13	1061,47	263,89		1,9	0,9	2240,9	7,5	0,8	2474,0
11	18	2035,36	507,37		14,1	17,7	1621,4	14,7	17,7	421,4

Apêndice C – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 3 (Alto Alegre), na porção noroeste do lixão, direção NE-SW (2° 55' 50" N; 61° 24' 18" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			259,0	4,7	324,6			
2	1,3	10,23			1007,0	9,1	1131,6			
3	1,8	19,96			529,0	10,0	1056,1			
4	2,4	35,80			155,9	5,6	996,6			
5	3,2	63,95			183,0	10,6	1104,0			
6	4,2	110,44			127,0	11,5	1219,7			
7	5,5	189,67	45,95		84,2	9,0	1774,5	895,0	8,8	4672,9
8	7,5	353,04	86,79		98,5	16,2	2146,5	332,0	16,2	1778,6
9	10	627,93	155,51		37,6	9,6	2459,4	122,5	9,3	2048,4
10	13	1061,47	263,89		102,5	56,1	1939,4	348,0	58,2	1577,9
11	18	2035,36	507,37		73,8	69,7	2155,1	247,0	69,5	1803,2
12	24	3618,72	903,21	357,98	7,4	19,3	1387,5	23,9	19,8	1090,2

Apêndice D – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 4 (Alto Alegre), realizada na entrada da cava de disposição de resíduos, na direção NE-SW (2° 55' 47" N; 61° 24' 16" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			48,7	2,6	110,3			
2	1,3	10,23			31,2	1,1	290,0			
3	1,8	19,96			184,7	1,1	3352,3			
4	2,4	35,80			55,9	0,9	2223,5			
5	3,2	63,95			747,0	16,3	2930,6			
6	4,2	110,44			287,0	11,4	2780,4			
7	5,5	189,67	45,95		237,0	17,0	2644,3	994,0	17,2	2655,2
8	7,5	353,04	86,79		73,0	17,0	1516,0	467,0	17,1	2370,1
9	10	627,93	155,51		78,5	14,2	3471,3	166,1	14,1	1831,9
10	13	1061,47	263,89		33,9	19,6	1835,9	86,7	19,5	1173,3
11	18	2035,36	507,37		66,6	76,7	1767,3	3,2	3,1	523,7
12	24	3618,72	903,21	357,98	66,6	76,0	3171,1	116,4	76,1	1381,5

Apêndice E – Dados da Sondagem Elétrica Vertical 5 (Alto Alegre), na porção sudeste do lixão, direção N-S, pilha de resíduos próxima à Vicinal 11 (2° 55' 39" N; 61° 24' 8" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			1036,0	4,7	1298,4			
2	1,3	10,23			447,0	2,9	1576,2			
3	1,8	19,96			395,0	3,5	2253,2			
4	2,4	35,80			211,0	3,0	2517,8			
5	3,2	63,95			46,9	1,1	2726,5			
6	4,2	110,44			295,0	10,6	3073,6			
7	5,5	189,67	45,95		786,0	23,0	6481,9	113	1,6	3244,9
8	7,5	353,04	86,79		548,0	34,5	5607,7	64,6	1,6	3504,0
9	10	627,93	155,51		11,8	1,7	4358,5	25,7	1,5	2664,4
10	13	1061,47	263,89		3,9	1,1	3763,4	6,4	1,0	1688,9
11	18	2035,36	507,37		17,9	16,3	2235,1	39,3	16,6	1201,2
12	24	3618,72	903,21	357,98	28,8	61,6	1691,9	69,2	60,6	1031,4

Apêndice F – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 1 (Cantá), direção N-S, realizada dentro da cava de disposição de resíduos do lixão (2° 34' 18" N; 60° 39' 25" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5 20						
1	1	5,89			205,0	339,5	3,6			
2	1,3	10,23			364,0	336,0	11,1			
3	1,8	19,96			110,5	146,1	15,1			
4	2,4	35,80			121,0	266,0	16,3			
5	3,2	63,95			127,3	425,0	19,2			
6	4,2	110,44			123,1	396,0	34,3			
7	5,5	189,67	45,95		129,2	379,0	64,7	190,4	397,0	22,0
8	7,5	353,04	86,79		192,1	336,0	201,8	192,2	295,0	56,5
9	10	627,93	155,51		145,9	350,0	261,8	198,0	354,0	87,0
10	13	1061,47	263,89		149,5	344,0	461,3	42,0	356,0	31,1
11	18	2035,36	507,37		126,4	202,0	1273,6	105,2	204,0	261,6
12	24	3618,72	903,21	357,98	69,6	196,0	1285,0	193,2	206,0	847,1
13	32		1606,92	639,47	53,4	64,9	1322,2	101,8	66,8	974,5

Apêndice G – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 2 (Cantá), realizada na entrada do lixão, direção E-W (2° 34' 19" N; 60° 39' 26" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			118,5	15,2	45,9			
2	1,3	10,23			69,9	5,1	140,2			
3	1,8	19,96			62,3	3,9	318,9			
4	2,4	35,80			61,9	4,7	471,5			
5	3,2	63,95			148,1	3,9	2428,4			
6	4,2	110,44			111,8	4,6	2684,2			
7	5,5	189,67	45,95		40,5	2,6	2954,5	180,7	2,5	3321,0
8	7,5	353,04	86,79		61,1	5,4	3994,5	199,0	5,9	2927,2
9	10	627,93	155,51		23,8	4,6	3248,8	199,0	9,4	3292,2
10	13	1061,47	263,89		27,6	7,5	3906,2	204,0	7,3	7374,6
11	18	2035,36	507,37		42,11	21,3	4023,9	200,0	21,1	4809,2
12	24	3618,72	903,21	357,98	16,8	15,1	4026,1	175,4	14,4	11001,6
13	32		1606,92	639,47	209,5	32,3	10423	140,0	32,6	2746,2

Apêndice H – Dados da Sondagem Elétrica Vertical 3 (Cantá), realizada na entrada do antigo lixão (atualmente propriedade privada), direção N-S (2° 34' 7" N; 60° 39' 24" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	
		0,5	2	5							20
1	1	5,89			424,0	1,9	1314,5				
2	1,3	10,23			111,0	2,1	540,5				
3	1,8	19,96			204,0	2,2	1851,3				
4	2,4	35,80			71,4	2,3	1111,3				
5	3,2	63,95			29,8	1,8	1058,7				
6	4,2	110,44			23,1	2,8	911,2				
7	5,5	189,67	45,95		13,0	3,6	684,9	91	3,6	1161,4	
8	7,5	353,04	86,79		5,2	2,5	734,3	36,9	3,6	889,6	
9	10	627,93	155,51		1,8	2,0	565,1	9,6	2,1	710,9	
10	13	1061,47	263,89		6,8	1,5	4812,0	4,4	1,6	725,7	
11	18	2035,36	507,37		9,5	31,8	608,0	48	31,5	773,1	
12	24	3618,72	903,21	357,98	86,3	81,6	3827,2	732	81,3	8132,2	
13	32		1606,92	639,47	12,9	25,9	800,4	29,9	24,6	777,2	
14	42		2769,31	1104,43	17,3	82,8	578,6	52,1	82,7	695,8	
15	55		4750,09	1896,74	1,3	13,6	454,1	2,3	13,1	333,0	
16	75		8834,16	3530,36	867,86	3,2	162,4	174,1	14,5	80,8	633,5
17	100		6279,26	1555,09	7,5	25,6	1839,6	42,4	20,8	3170,0	

Apêndice I – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 4 (Cantá), direção N-S, realizada na borda oeste da cava de disposição de resíduos sólidos (2° 34' 16" N; 60° 39' 26" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			147,1	3,8	228,0			
2	1,3	10,23			139,1	3,2	444,5			
3	1,8	19,96			140,3	3,2	875,3			
4	2,4	35,80			143,3	3,5	1465,7			
5	3,2	63,95			146,8	3,2	2933,6			
6	4,2	110,44			100,8	2,8	3975,9			
7	5,5	189,67	45,95		35,2	1,8	3709,2	182,0	1,8	4645,6
8	7,5	353,04	86,79		25,2	2,7	3295,0	119,2	2,9	3567,2
9	10	627,93	155,51		19,3	3,9	3107,4	87,1	3,8	3564,4
10	13	1061,47	263,89		4,5	2,3	2076,8	13,3	2,3	1526,0
11	18	2035,36	507,37		2,8	2,9	1965,2	6,9	2,8	1250,3
12	24	3618,72	903,21	357,98	1,0	2,7	1340,3	0,9	2,8	290,3

Apêndice J – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 5 (Cantá), direção N-S, realizada na borda SE da cava de disposição de resíduos sólidos (2° 34' 16" N; 60° 39' 23" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			151,8	1,4	638,7			
2	1,3	10,23			158,5	1,6	1013,0			
3	1,8	19,96			166,8	1,7	1958,9			
4	2,4	35,80			198,0	1,7	4169,5			
5	3,2	63,95			75,8	1,3	3728,6			
6	4,2	110,44			30,0	1,0	3313,3			
7	5,5	189,67	45,95		39,4	2,0	3736,6	30,8	43,3	32,7
8	7,5	353,04	86,79		12,9	1,3	3503,2	47,6	1,3	3177,7
9	10	627,93	155,51		6,9	1,2	3610,6	33,3	1,1	4707,7
10	13	1061,47	263,89		4,3	1,6	2852,7	8,4	1,6	1385,4
11	18	2035,36	507,37		1,0	1,3	1565,7	6,1	1,2	2579,1
12	24	3618,72	903,21	357,98	0,9	1,9	1714,1	5,2	2,0	2348,3

Apêndice K – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 1 (Normandia), sobre a pilha de resíduos 2, direção E-W (3° 51' 10" N; 59° 41' 24" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			760	2,4	1865,3			
2	1,3	10,23			393	2,1	1913,7			
3	1,8	19,96			297	2,9	2044,7			
4	2,4	35,80			172,5	2,7	2287,1			
5	3,2	63,95			102,8	2,8	2347,8			
6	4,2	110,44			56,5	2,5	2496,0			
7	5,5	189,67	45,95		26,2	2,0	2484,7	122,7	2,1	2684,5
8	7,5	353,04	86,79		17,8	2,8	2244,3	86,7	2,6	2894,0
9	10	627,93	155,51		8,2	2,1	2451,9	35,9	2,1	2658,5
10	13	1061,47	263,89		3,7	2,0	1963,7	15,7	1,9	2180,6
11	18	2035,36	507,37		5,3	6,6	1634,5	21,7	6,6	1668,2
12	24	3618,72	903,21	357,98	6,8	23,7	1038,3	35,2	23,7	1341,5
13	32		1606,92	639,47	29,5	44,9	1055,8	74,9	45,1	1062,0
14	42		2769,31	1104,43	16,9	53,7	871,5	31,4	53,7	645,8
15	55		4750,09	1896,74	16,9	120,3	667,3	27,8	120,6	437,2

Apêndice L – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 2 (Normandia), região afastada da área de disposição de resíduos sólidos, direção NE-SW (3° 51' 9" N; 59° 41' 31" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)				ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5	20						
1	1	5,89				370,0	2,3	947,6			
2	1,3	10,23				121,3	1,8	689,1			
3	1,8	19,96				572,3	1,9	6013,6			
4	2,4	35,80				320	1,7	6738,5			
5	3,2	63,95				141,3	1,2	7529,8			
6	4,2	110,44				89,8	1,6	6198,6			
7	5,5	189,67	45,95			39,3	1,2	6211,8	188,2	1,2	7205,8
8	7,5	353,04	86,79			18,9	1,4	4766,0	85,4	1,3	5701,2
9	10	627,93	155,51			8,7	1,4	3902,1	37,3	1,4	4143,2
10	13	1061,47	263,89			1,8	1,3	1469,7	12,5	1,2	2748,9
11	18	2035,36	507,37			1,2	1,6	1526,5	5,2	1,6	1648,9
12	24	3618,72	903,21	357,98		6,4	17,4	1331,0	21,4	17,5	1104,5
13	32		1606,92	639,47		6,9	16,6	667,9	19,2	16,7	735,2
14	42		2769,31	1104,43		3,1	20,8	412,7	9,3	20,8	493,8
15	55		4750,09	1896,74		3,4	31	521,0	7,4	31,7	442,8
16	75		8834,16	3530,36	867,86	1,1	17,8	545,9	2,8	18	549,2
17	100		6279,26	1555,09		1,7	13,1	814,9	6,8	13,2	801,1

Apêndice M – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 3 (Normandia), sobre a pilha de resíduos 1, direção E-W (3° 51' 8" N; 59° 41' 20" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			52,1	2,6	118,0			
2	1,3	10,23			183,0	1,7	1100,8			
3	1,8	19,96			46,6	1,1	845,8			
4	2,4	35,80			46,6	1,9	878,0			
5	3,2	63,95			35,9	2,8	819,9			
6	4,2	110,44			46,2	3,1	1646,0			
7	5,5	189,67	45,95		17,1	2,7	1201,3	61,8	2,7	1051,6
8	7,5	353,04	86,79		20,4	4,7	1532,3	71,8	4,6	1354,6
9	10	627,93	155,51		24,1	7,5	2017,7	83,4	7,2	1801,3
10	13	1061,47	263,89		13,5	6,1	2349,1	159,7	6,4	6585,0
11	18	2035,36	507,37		13,2	3,4	7902,0	11,6	3,3	1783,5
12	24	3618,72	903,21	357,98	27,4	39,9	2485,0	97,5	39,9	2207,1
13	32		1606,92	639,47	141,1	134,6	1684,5	31,9	136,6	149,3
14	42		2769,31	1104,43	16,8	37,2	1250,7	38,0	37,2	1128,2

Apêndice N – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 4 (Normandia), parte setentrional da pilha de resíduos 2, direção SW-NE (3° 51' 12" N; 59° 41' 27" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			166,5	2,1	467,0			
2	1,3	10,23			159	10,2	159,4			
3	1,8	19,96			162,3	10,3	314,6			
4	2,4	35,80			161,2	11,3	510,7			
5	3,2	63,95			158,0	10,4	971,5			
6	4,2	110,44			145,0	21,7	738,0			
7	5,5	189,67	45,95		150,5	43,9	650,2	275	44,3	285,2
8	7,5	353,04	86,79		20,9	12,3	599,9	83,3	12,3	587,7
9	10	627,93	155,51		15,7	15,8	624,0	37,6	1,2	4872,6
10	13	1061,47	263,89		30,9	11,1	2954,9	15,7	1,1	3766,5
11	18	2035,36	507,37		25,8	23,3	2253,7	108,0	23,1	2372,1
12	24	3618,72	903,21	357,98	8,6	23,5	1324,3	35,9	23,5	1379,8
13	32		1606,92	639,47	9,5	19,1	799,3	24,7	18,9	835,7
14	42		2769,31	1104,43	4,2	21,3	546,1	10,3	21,3	534,1
15	55		4750,09	1896,74	2,1	18,5	539,2	4,9	18,3	507,9

Apêndice O – Dados de campo da Sondagem Elétrica Vertical 5 (Normandia), ao lado da célula do Aterro Sanitário desativado, direção N-S (3° 51' 6" N; 59° 41' 23" O).

n°	AB/2 (m)	MN (m)			ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)	ΔV (mV)	I (mA)	ρ_a ($\Omega.m$)
		0,5	2	5						
1	1	5,89			22,4	1,4	94,2			
2	1,3	10,23			18,4	1,2	156,8			
3	1,8	19,96			21,2	1,6	264,5			
4	2,4	35,80			70,5	2,8	901,4			
5	3,2	63,95			21,3	2,6	523,9			
6	4,2	110,44			11,7	1,8	717,9			
7	5,5	189,67	45,95		7,4	1,9	738,7	39,1	1,9	945,5
8	7,5	353,04	86,79		3,4	1,4	857,4	23,2	1,4	1438,2
9	10	627,93	155,51		9,2	1,8	3209,4	23,2	1,7	2122,2
10	13	1061,47	263,89		1,1	1,4	834,0	9,8	1,4	1847,3
11	18	2035,36	507,37		9,0	3,7	4950,9	53,0	13,8	1948,6
12	24	3618,72	903,21	357,98	2,9	10,1	1039,0	21,5	10,4	1867,2
13	32		1606,92	639,47	6,8	13,3	821,6	35,0	13,4	1670,3
14	42		2769,31	1104,43	6,4	6,2	2858,6	10,2	6,5	1733,1
15	55		4750,09	1896,74	7,0	14,8	2246,7	6,8	14,7	877,4