

Método da tomografia elétrica para investigação subsuperficial de um lixão no município de Jaciara-MT

Application of Electrical Resistivity Tomography for subsurface investigation of a dump in the city of Jaciara-MT

Beatriz Yanagi Mendes de Moraes¹ , Fernanda Vieira Xavier¹ ,
Sérgio Junior da Silva Fachin¹ , Leonides Gureli Netto² 

¹Universidade Federal de Mato Grosso, Rua Quarenta e Nove, 2.367, Boa Esperança, CEP: 78060-900, Cuiabá, MT, BR (beatrizyanagi@outlook.com; ferx.unesp@gmail.com; sergio.fachin@ufmt.br)

²Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, SP, BR (leonidesnetto@ipt.br)

Recebido em 3 de janeiro de 2023; aceito em 21 de setembro de 2023.

Resumo

No Brasil, em torno de 15,9 milhões de toneladas de resíduos urbanos são depositados em lixões. O líquido proveniente da decomposição da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares, conhecido como chorume e lixiviado, pode ocasionar sérios problemas ambientais e para a saúde pública. O método da eletrorresistividade permite detectar contaminação e inferir a profundidade de deposição de resíduos por meio de injeções de eletricidade no solo e interpretar as diferenças de potencial medidas, que são capazes de fornecer informações sobre a distribuição da resistividade elétrica abaixo da superfície. O método da eletrorresistividade foi empregado neste trabalho por ser uma alternativa rápida, de baixo custo e não invasiva, ou seja, a princípio, não altera o meio físico. As resistividades mais elevadas (entre 1.670 e 875.5 ohm.m) foram relacionadas às formações Furnas e Ponta Grossa e os segmentos mais condutivos (< 875.5 ohm.m) interpretados como influenciados pela disposição de resíduos sólidos. Os valores de resistividade sugeriram não haver presença aparente de lixiviado, contudo considerou-se a hipótese de que o lixiviado estivesse presente em alguns pontos e determinadas profundidades da área do lixão.

Palavras-chave: Geofísica rasa; Investigação ambiental; Eletrorresistividade.

Abstract

In Brazil, around 15.9 million tons of urban waste are deposited in landfills. The liquid from the decomposition of the organic fraction of household solid waste, known as slurry and leachate, can cause serious environmental and public health problems. The electrical resistivity method allows checking the presence of contamination and inferring the depth of waste deposition through injections of electricity into the soil and interpretation of measured potential differences, which are capable of providing information on the distribution of electrical resistivity below the surface. The electrical resistivity method was used in this work as it is a fast, low-cost, and non-invasive alternative, that is, in principle, it does not change the physical environment. The highest resistivities (between 1,670 and 875.5 ohm.m) were related to the Furnas and Ponta Grossa Formations and the most conductive segments (< 875.5 ohm.m) were interpreted as influenced by solid waste disposal. The resistivity values suggest that there is no apparent presence of leachate, however there is a hypothesis that the leachate is present in some points and certain depths of the dump area.

Keywords: Near surface geophysics; Environmental investigation; Electrical resistivity tomography.

INTRODUÇÃO

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) estima que a população brasileira tenha chegado ao patamar de 215 milhões de pessoas. Fenômenos globais, como o crescimento populacional, a tendência crescente de urbanização, o crescimento econômico, número significativo de pessoas saindo da pobreza para se integrar ao meio emergente de classe, padrões claramente insustentáveis de produção e consumo ligados a uma economia linear resultaram em aumento constante na geração de resíduos (Zhongming et al., 2016).

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019) estimou que foram coletadas 65,11 milhões de toneladas por ano, ou 178,4 mil toneladas por dia, de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros. Desse montante, apenas 48,1 milhões de toneladas foram dispostas em aterros sanitários (75,1% do total anual aproximado), e o restante, em torno de 15,9 milhões de toneladas, disposto em lixões.

Nos lixões, os resíduos em estado bruto são depositados sobre o solo sem impermeabilização de base e sem sistemas de tratamento dos efluentes líquidos e gasosos, dessa forma, os riscos e os impactos são causados por poluentes ou substâncias perigosas, que podem tanto ser de determinado grupo de resíduos (Classe I — Perigosos), ou aqueles formados no lixão por si mesmos, por meio de interações físico-químicas. Os impactos ambientais podem afetar a água, o solo e o ar (Savino et al., 2018).

No Brasil, a regularização de aterros sanitários é feita por meio de licenciamento ambiental. Diferentemente dos lixões, para instalação de aterros sanitários, é necessário elaborar uma gama de estudos socioambientais e dimensionar projetos de engenharia na área a ser utilizada. Tanto empreendimentos privados quanto públicos devem seguir as diretrizes de cada estado, bem como as federais, a exemplo da Resolução nº 404/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e as normas técnicas, como a NBR 8419/1992.

O líquido proveniente da decomposição da fração orgânica dos resíduos orgânicos domiciliares é conhecido como chorume, e a solução do chorume e da água, de origem superficial (chuva ou escoamento) ou subterrânea, é conhecida como lixiviado. Esse líquido pode tanto infiltrar no solo quanto fluir lateralmente e, a depender das características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas da área, contaminar águas superficiais e subterrâneas, inviabilizar sua utilização e trazer grandes prejuízos ambientais (Foster et al., 2002).

O material lixiviado contém grande número de contaminantes inorgânicos, sólidos totais dissolvidos e contaminantes orgânicos, e muitos desses lixiviados contêm componentes tóxicos de resíduos líquidos colocados no aterro

(Freeze e Cherry, 1979). Em ambientes como os lixões, que recebem resíduos de origem domiciliar, comercial e industrial, Christensen et al. (2001) identificaram quatro grupos de poluentes:

- matéria orgânica dissolvida expressa pela demanda química de oxigênio (DQO) ou carbono orgânico total (COT), incluindo metano (CH₄), ácidos graxos voláteis;
- macrocomponentes inorgânicos representados por Ca, Mg, Na, K, NH₄⁺, Fe, Mn, Cl, SO₄²⁻ e HCO₃⁻;
- metais pesados, como Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn;
- compostos orgânicos xenobióticos (COXs) originários de produtos químicos domésticos ou industriais presentes em concentrações baixas no lixiviado.

Freeze e Cherry (1979) apontam que, em regiões com condições climáticas caracterizadas como não áridas, como é o caso da área de estudo, a produção de chorume é continuada, em geral, ao menos nas duas primeiras décadas, podendo perdurar por muitas outras e, em alguns casos, centenas de anos. Porém, é importante enfatizar que o tempo e o volume de produção dependerão do volume de lixo acumulado, do tamanho da área do lixão, do tipo de lixo descartado e das condições climáticas do local, o que torna essa medição bastante subjetiva, na ausência de tais dados.

Os métodos diretos de investigação permitem a observação direta do subsolo por meio de coleta de amostras de uma sondagem ou análises laboratoriais de propriedades *in situ*. Por outro lado, métodos indiretos, como a geofísica, em virtude de suas características não invasivas e não destrutivas, podem ser menos onerosos e mais ágeis nos ensaios de campo. Os métodos geofísicos são vantajosos em relação aos tradicionais de investigação de subsuperfície, por sua agilidade e custo reduzido na avaliação de áreas extensas (CETESB, 2001).

Nas últimas duas décadas, o método da eletrorresistividade tem sido vastamente aplicado com êxito na investigação ambiental em lixões e aterros sanitários. Estudos, como os de Morales et al. (2001), Shiraiwa et al. (2002), Moura e Malagutti Filho (2003), Hatae et al. (2004), Fachin et al. (2006), Da Silva et al. (2007), Bortolin e Malagutti Filho (2009), De Almeida Santos et al. (2009), De Oliveira e Sousa (2010), De Oliveira et al. (2012) e Moreira et al. (2013, 2015, 2018), podem ser citados, neles se discute a aplicação da eletrorresistividade com diversas técnicas e arranjos eletrônicos para investigar o meio físico e monitorar contaminantes em depósitos de resíduos sólidos.

Dado o contexto, o objetivo deste trabalho foi o de investigar área do lixão desativado de Jaciara-MT por meio do método da eletrorresistividade, pela técnica da tomografia elétrica e do arranjo de eletrodos dipolo-dipolo, a fim de estimar a profundidade da camada de resíduos ali depositados e assim traçar uma avaliação quanto à aptidão da metodologia de investigação.

Contextos fisiográficos e geológicos

Em termos geomorfológicos, o município de Jaciara está inserido no Planalto dos Guimarães, na subunidade Planalto dos Alcantilados, que apresenta feições morfológicas complexas marcadas por escarpas alcantiladas (ingremes) constituídas por formas tabulares descontínuas e marcadas por alinhamentos de falha que delimitam patamares estruturais, morros residuais em forma de mesetas tabulares e setores rebaixados, acompanhando os fundos de vale onde prevalecem colinas e morros de topos e vertentes convexas (Ross, 2014). No Planalto dos Alcantilados, as formas de relevo estão relacionadas às litologias da Formação Ponta Grossa, onde predomina o argissolo vermelho-amarelo eutrófico (Brasil, 1982). O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos descreve esse tipo como o que apresenta variadas profundidades dentro da sua categoria de classificação, dada a região de ocorrência, podendo ser bem drenado ou não, conforme a profundidade do incremento de argila do horizonte iluvial, que pode dificultar a percolação da água ou solução. Os argissolos geralmente ocorrem no terço médio inferior da vertente, mas podem ser encontrados no terço médio superior regional da paisagem.

A área de estudo está inserida num contexto geológico bastante conhecido: a Bacia Sedimentar do Paraná. Historicamente, diversos trabalhos de mapeamento geológico foram realizados nessa bacia sedimentar intracratônica, como os de Soares (1991), Assine et al. (1994) e Milani (1997), entre outros. Essa bacia é uma das três áreas de sedimentação independente da Província Paraná, juntamente com a Bacia Serra Geral e a Bacia Bauru (Bizzi et al., 2001). O registro estratigráfico da Bacia Sedimentar do Paraná contempla seis unidades alostratigráficas de segunda ordem ou superseqüências: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru (Milani, 1997).

O município de Jaciara está situado na fração noroeste da Bacia do Paraná e na porção centro-meridional de Mato Grosso, na borda sudeste do Cráton Amazônico. A superseqüência seguinte, aflorante na área de estudo, é a Superseqüência Paraná, relativa à organização de sedimentos devonianos, subdividida em duas unidades: a Formação Furnas e a Formação Ponta Grossa. O pacote inferior, denominado Formação Furnas, é composto por arenitos quartzosos brancos e conglomerados de deposição em ambiente fluvial e transicional com espessura de cerca de 250 metros. Por sua vez, a Formação Ponta Grossa possui composição pelítica, constituída por folhelhos e dividida em três membros: Jaguariaíva, Tibagi e São Domingos (Lange e Petri, 1967). Os três membros juntos ultrapassam 600 metros de espessura em subsuperfície e apresentam 300 metros remanescentes em afloramentos (Milani, 1997; Milani et al., 2007).

Conforme arquivos vetoriais da Folha Dom Aquino-Rondonópolis (Abreu Filho e Albuquerque, 2016), escala

1:100.000, a área de estudo está localizada sobre a Formação Furnas, próxima de um curso d'água perene e a três falhas extensionais normais, sendo duas paralelas na direção NE-SW e outra na direção NW-SE. No local, ainda há uma estrutura pontual (acamamento) com azimute (direção) de mergulho de 140° e ângulo de 7° na notação Clar. O principal reservatório local é o Aquífero Furnas, que no sul de Mato Grosso pode variar de livre a confinado, dependendo da ocorrência dos estratos confinantes sobrejacentes (Formação Ponta Grossa) (Da Silva e Migliorini, 2014).

Hidrograficamente, a região está incluída na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata e na sub-bacia hidrográfica do Alto Paraguai. Os principais rios do município são o Pombas e o São Lourenço. Nessa área, predomina o clima tropical chuvoso, especificamente o tipo climático AW de Köppen, classificado como quente e úmido, com duas estações características: uma seca e a outra chuvosa. A temperatura média ao longo do ano é em torno de 25°C e as precipitações pluviométricas médias anuais são da ordem de 1.350 mm a 2.000 mm. Em julho e agosto, são registrados os menores índices pluviométricos (Brasil, 1982 — Folha SD.21 Cuiabá).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O município de Jaciara está localizado na porção sudeste do estado de Mato Grosso, a 148 km da capital, Cuiabá. O acesso é por meio da rodovia BR 163/364. Próximo do município, num raio de cerca de 50 km, são encontrados os municípios de Campo Verde, Dom Aquino, São Pedro da Cipa, Juscimeira e Santo Antônio do Leverger, conforme ilustrado na Figura 1. Os dados demográficos coletados no último censo registrado pelo IBGE (2022) apontam uma população de aproximadamente 25.647 habitantes no município.

O Produto Interno Bruto (PIB) de Jaciara foi de R\$ 837,22 milhões em 2017 e se baseou principalmente na agropecuária voltada para o rebanho bovino, na produção de cana-de-açúcar, algodão, soja, mandioca, borracha, cocoda-baía e biocombustíveis e para o turismo (Prefeitura de Jaciara, 2020).

O lixão objeto deste estudo tem área de aproximadamente 2,70 hectares, dimensões obtidas por análise de imagens orbitais recentes. De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de Jaciara, o lixão recebia, em média, 39 toneladas de resíduos por dia, do próprio município, além dos resíduos gerados pelo vizinho Dom Aquino. Ainda de acordo com informações obtidas pelo PMSB, os resíduos eram dispostos de forma indiscriminada e sem cobertura com solo ou material inerte.

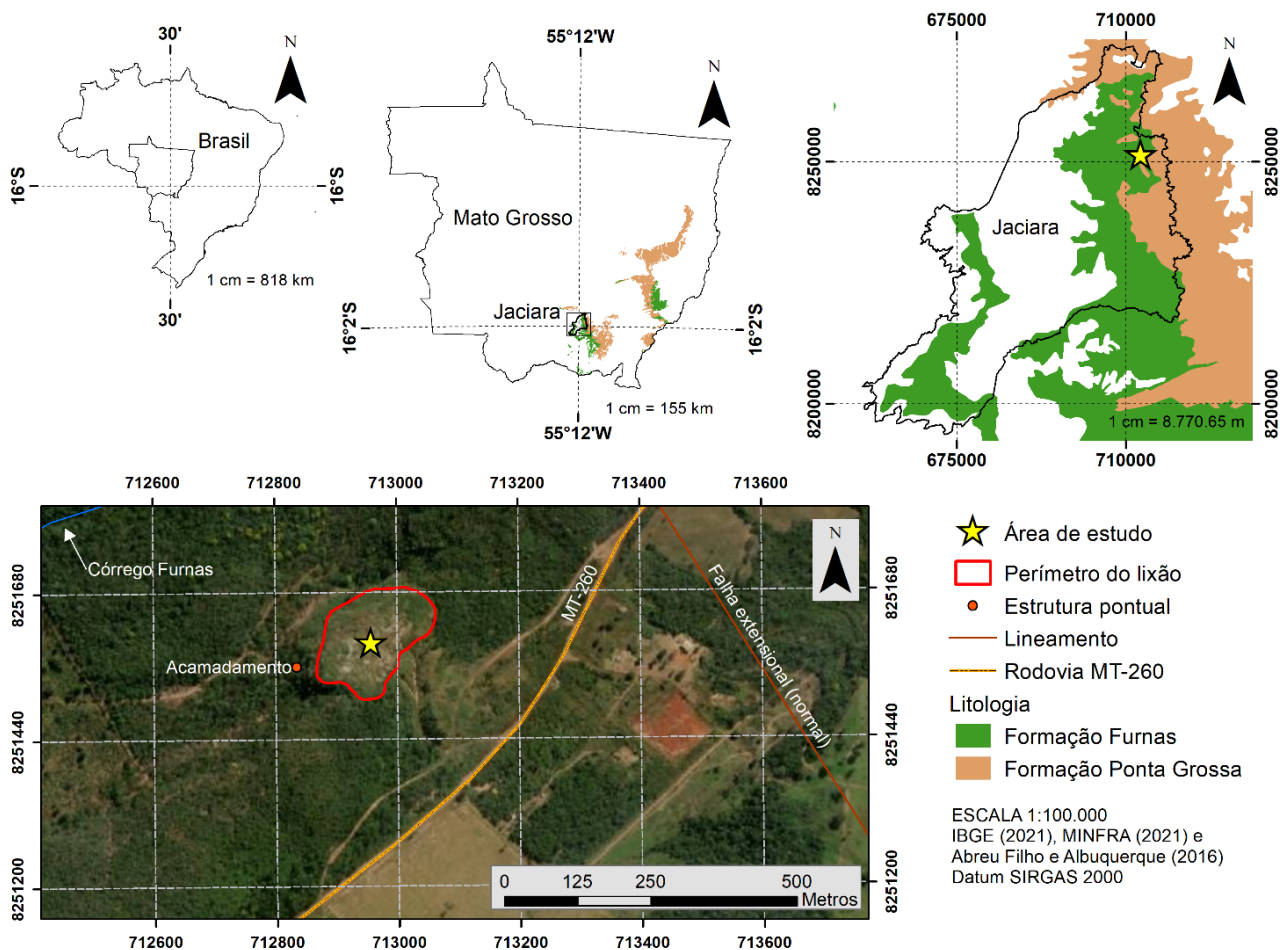


Figura 1. Localização da área de estudo e geologia regional.

A Prefeitura Municipal de Jaciara não soube informar o tempo de operação, mas imagens do Google Earth mostram que o uso da área se iniciou há, pelo menos, 12 anos. Atualmente, o lixão encontra-se desativado, o acesso ao local foi bloqueado e os resíduos sólidos domésticos gerados no município atualmente são depositados em área de transbordo e semanalmente encaminhados ao aterro sanitário de Rondonópolis, a 72 km de distância.

Conforme se observa na foto aérea da área (Figura 2), os resíduos sólidos foram depositados em um tabuleiro com altitude geométrica de 410 metros, medido com equipamento RTK GNSS TRIMBLE R8s, e delimitado por escarpas íngremes. Na escarpa, é possível observar cavidades na rocha e, abaixo dela, há uma região de fundo de vale com aproximadamente 363 metros de altitude geométrica; as vias de acesso ao local estão na cota de 440 metros de altitude geométrica.

A Resolução CONAMA nº 303/2002 define como Área de Preservação Permanente a faixa de 100 metros das escarpas

e das bordas de tabuleiros, além das chapadas na zona rural, local onde foi implantado o lixão. O uso de áreas com essas características íngremes para deposição de resíduos sólidos, além de infringir a legislação vigente, propicia erosões, espalhamento de material contaminante e alteração permanente da geomorfologia local.

Eletrorresistividade

A resistividade de uma formação ao fluxo de uma corrente elétrica depende fortemente da presença de água, da composição da água e da porosidade das rochas. Esses parâmetros são altamente variáveis, pois dependem da concentração e do tipo de minerais dissolvidos (Lowrie, 2007; Tiab e Donaldson, 2015). Como a grande maioria das rochas conduz eletricidade por processos eletrolíticos em detrimento de eletrônicos, a porosidade e a composição da água nos poros são os principais controles da resistividade das rochas, e a resistividade comumente aumenta com a diminuição

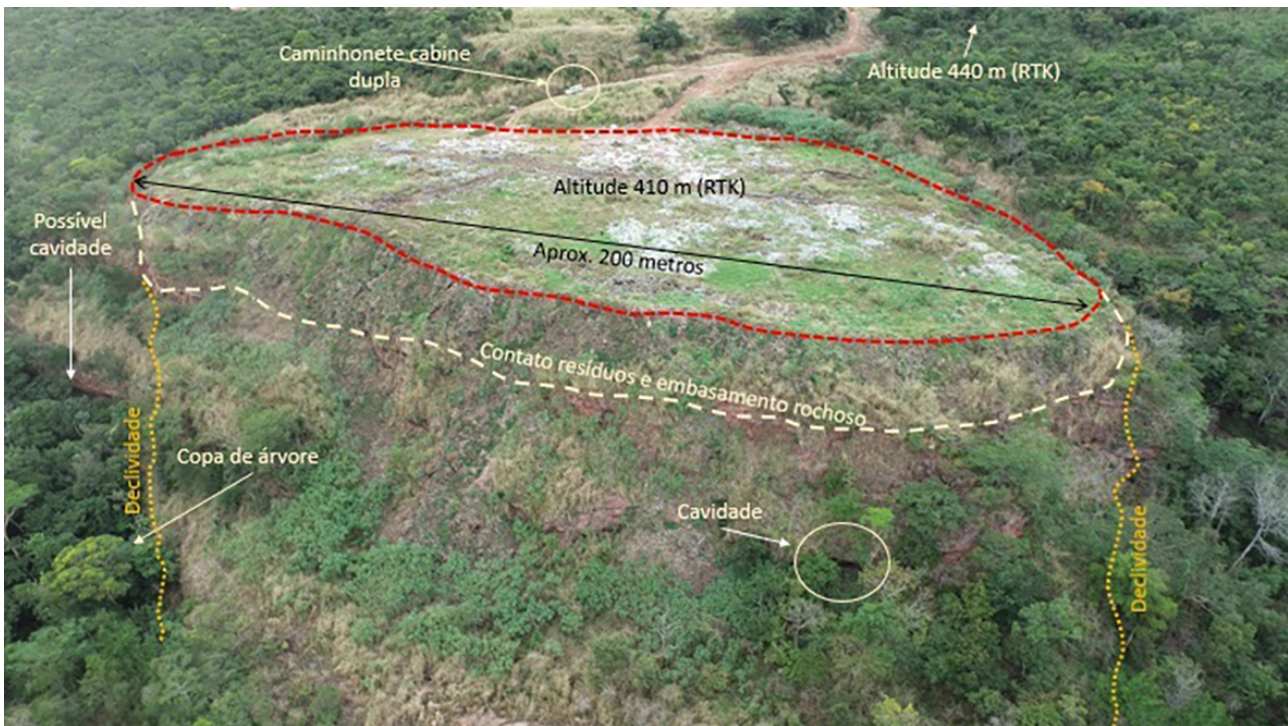


Figura 2. Vista aérea da área do lixão.

da porosidade, exceto em rochas cristalinas que, apesar de sua porosidade intergranular insignificante, são condutoras ao longo de fraturas e fissuras (Kearey et al., 2009; Netto et al., 2020).

Em levantamento por meio do método da eletrorresistividade na superfície do terreno, um campo elétrico subsuperficial foi criado ao injetar no solo uma corrente elétrica (I) por um par de eletrodos cravados no solo, denominados A e B. A diferença de potencial elétrico (ΔV) foi medida em outro par de eletrodos (M e N), também cravados no solo, e que foram capazes de fornecer informações sobre a distribuição da resistividade elétrica aparente abaixo da superfície (Parasnis, 1986; Fitts, 2002).

Os valores medidos por resistímetros em meios heterogêneos são chamados de resistividades elétricas aparentes (ρ_a), que são expressas em (Ωm) ou ohm.m. Existem três principais tipos de configuração de eletrodo: arranjo Schlumberger, Wenner e dipolo-dipolo (Kearey et al., 2009). As diferenças de potenciais elétricos e correntes elétricas medidas, junto com o fator geométrico (k) relativo aos espaçamentos ABMN utilizados na coleta de dados, permitem calcular a resistividade elétrica aparente, que é a medida referente ao meio geológico não homogêneo. A Equação 1 demonstra o cálculo da resistividade aparente.

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (1)$$

onde k é definido pela Equação 2:

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (2)$$

Para aquisição de dados por meio do método da eletrorresistividade, existem três técnicas de investigação, as quais consistem em procedimentos para estudar as variações de parâmetros físicos do meio geológico, cuja diferença básica está na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior de furos de sondagens e no modo de desenvolvimento dos trabalhos. Enquanto a sondagem e a perfilagem elétricas são utilizadas para investigação a partir de um ponto fixo no terreno, a tomografia elétrica é aplicada na investigação lateral de discontinuidades dos materiais geológicos (Braga, 2016).

Na tomografia elétrica associada ao arranjo dipolo-dipolo (Figura 3), as diferenças laterais observadas na resistividade elétrica são obtidas a partir de uma posição fixa dos eletrodos de injeção de corrente elétrica (A e B) em relação à posição dos eletrodos de medida do potencial elétrico (M e N) que, por sua vez, são movidos a uma separação constante, até que toda a área de levantamento seja coberta.

O aumento da separação de eletrodos AB e MN permite ao fluxo da corrente elétrica no meio chegar a profundidades maiores, conforme pode ser observado na Figura 3. As resistividades aparentes medidas podem ser plotadas numa pseudosseção de curvas de contornos, que reflete

qualitativamente a variação espacial da resistividade na seção transversal vertical (Parasnis, 1986; Griffiths e Barker, 1993; Vogelsang, 1994). Contudo, a profundidade de investigação não depende somente da configuração geométrica do sistema de medidas, mas também dos contrastes das resistividades nas litologias em subsuperfície (Gallas, 2000; Netto et al., 2021).

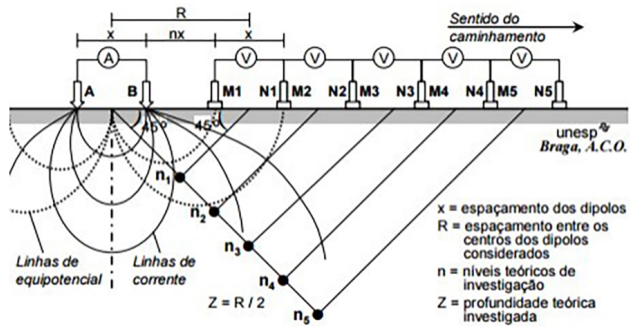


Figura 3. Disposição dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo.

Levantamentos geofísicos

Os levantamentos geofísicos na área do lixão foram executados ao longo de três perfis de tomografia elétrica utilizando o arranjo dipolo-dipolo e adicionalmente dois perfis a montante (perfis de *Background*) na via de acesso não pavimentada (rodovia MT-260). Os ensaios geofísicos foram realizados em julho de 2021, no período de estiagem, usando-se um resistivímetro multieletródico Syscal PRO 48 (fabricado pela empresa francesa IRIS Instruments), bobinas de cabos para tomografia elétrica e eletrodos de aço inoxidável. Para o levantamento de informações de coordenadas e cota topográfica de alta precisão, foi utilizado o equipamento RTK GNSS TRIMBLE R8s.

Os cinco perfis de tomografia elétrica (Figura 4) tiveram extensão de 240 metros e abertura de eletrodos de 5 metros, e tomadas medidas de coordenadas de posição e cota topográfica para todos os perfis. Os dados de resistividade elétrica aparente coletados pelo resistivímetro foram organizados e filtrados, quando necessário, pelo critério do desvio padrão no *software* Prosys III, versão 1.06 (IRIS Instruments). Posteriormente, os dados de todos os cinco

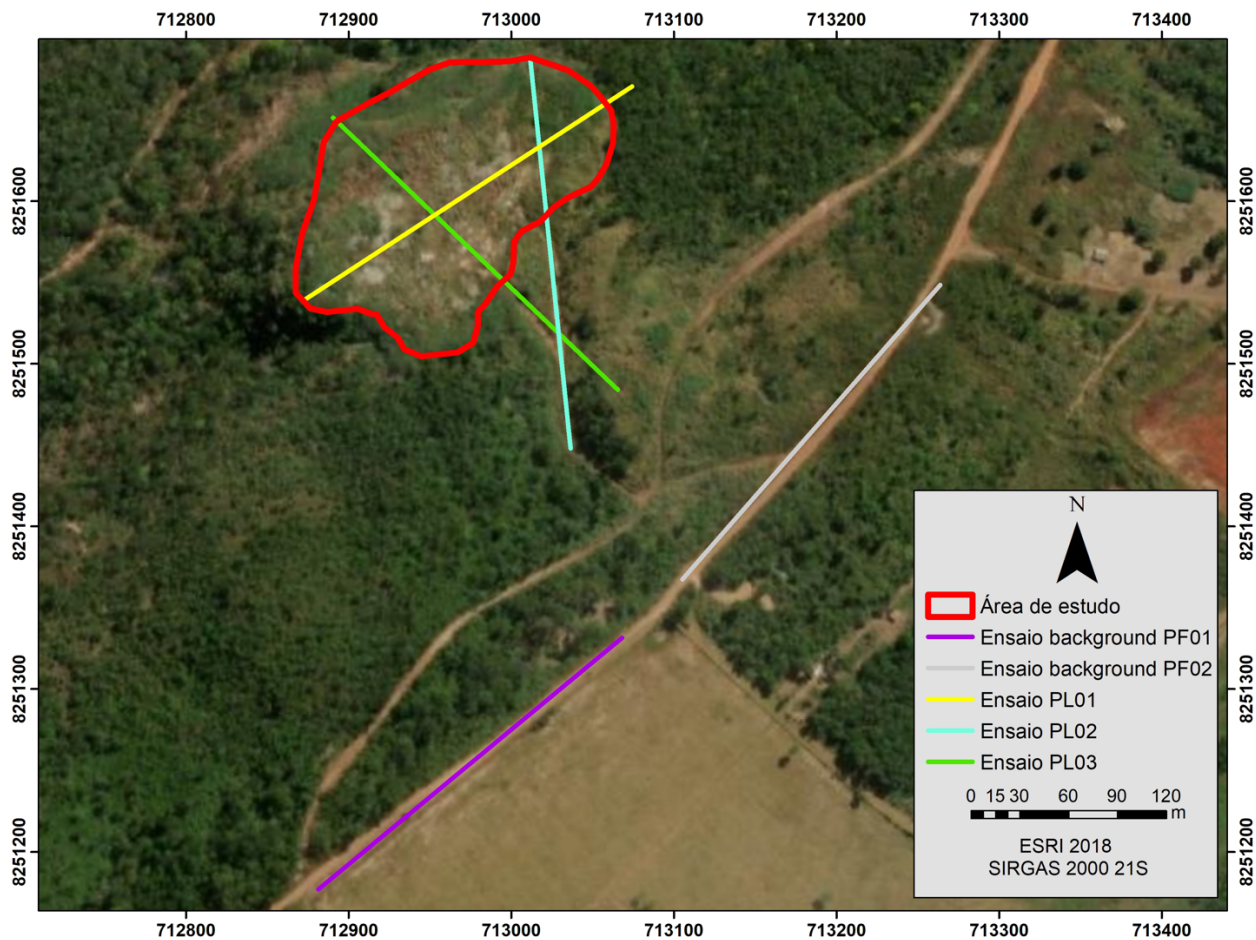


Figura 4. Localização espacial das seções de tomografia elétrica executadas na área do lixão.

perfis foram exportados para o formato do programa de modelagem inversa ResIPy (2022), versão 3.3.3 (*software* livre) e assim modelados para resultar numa seção de resistividade elétrica utilizando a malha triangular e o método da inversão quadrática (Blanchy et al., 2020).

Os dados modelados geraram resultados considerados de boa qualidade, pois os valores de erro quadrático médio (RMS) obtidos nas iterações finais dos modelos geoeletricos não ultrapassaram 1,38. Essencialmente, a raiz do RMS é a diferença entre os valores observados e os valores calculados em média e, quanto mais próximos de zero, mais confiáveis.

RESULTADOS

A bibliografia aponta que a área de estudo se localiza sobre a Formação Furnas, composta de arenitos quartzosos, contudo, não pode ser descartada a possibilidade de pelitos da Formação Ponta Grossa, de composição pelítica e características menos

resistivas no local, uma vez que o mapeamento foi realizado pela SGB-CPRM na escala 1:100.000. Os modelos geoeletricos apresentados neste trabalho são em menor escala, por isso mais detalhados. Não obstante, em alguns modelos, as camadas geológicas não se apresentam horizontalizadas, como se espera de uma formação sedimentar. Por conseguinte, entende-se que o método da eletrorresistividade é indireto e mostra apenas a variação da resistividade elétrica em subsuperfície, e não necessariamente a seção geológica presente na área, e que limitações do *software* livre podem impactar a interpretação dos modelos.

O Quadro 1 apresenta intervalos de valores de resistividade obtidos por meio da modelagem dos dados de resistividade elétrica obtidos neste trabalho, de acordo com a descrição da geologia local e valores de resistividade elétrica obtidos por Astier (1975), Telford et al. (1990), Lowrie (2007) e Braga (2016).

A seção PF01 (Figura 5), perfil de *background*, ou seja, local sem a disposição irregular de resíduos sólidos, foi realizada à distância de 230 m da área do lixão. Essa seção

Quadro 1. Faixas de resistividade interpretadas por modelos geoeletricos e bibliografia.

Faixa de resistividade (ohm.m)	Interpretação
< 5	Presença de lixiviado
5–837,5	Deposição de resíduos sólidos e/ou pelitos da Formação Ponta Grossa
837,5–1670	Arenitos da Formação Furnas
1.670–2.502,5	Varição da composição mineralógica da Formação Furnas e/ou sedimentos arenosos inconsolidados
2.502,5–5.000	Solos residuais e/ou sedimentos arenosos inconsolidados

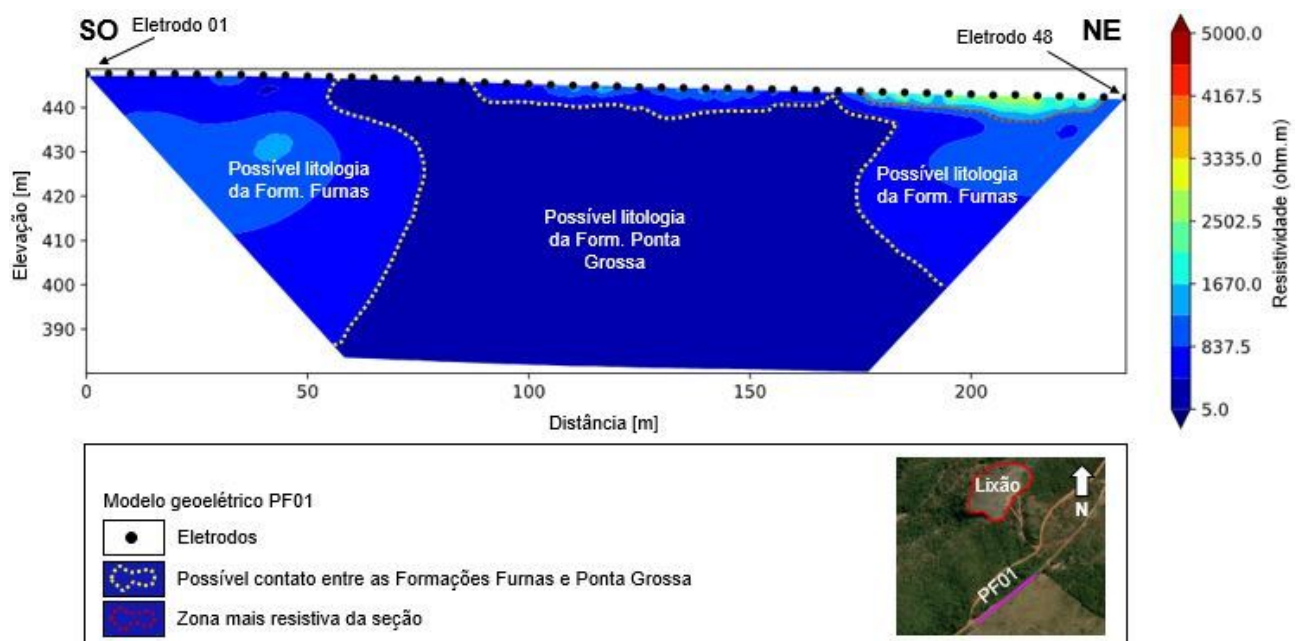


Figura 5. Modelo geoeletrico PF01.

obteve um erro RMS de 1,01 depois de duas iterações e apresenta três camadas geoeletricas: a primeira ocorre na superfície nordeste da seção, com resistividade elétrica acima de 1.670 ohm.m, interpretada como sedimentos inconsolidados e solo residual seco em razão de o ensaio ter sido executado em rodovia não pavimentada e período de estiagem. A segunda camada possui valores de resistividade elétrica entre 1.670 e 837.5 ohm.m e foi interpretada como arenito da Formação Furnas, enquanto a terceira camada, com resistividades abaixo de 837.5 ohm.m, pôde ser associada a pelitos da Formação Ponta Grossa.

A seção PF02, apresentada na Figura 6 (perfil de *background*), realizada a 200 metros a montante do lixão, foi obtida ao fim de três iterações, com erro RMS de 1.32. Os valores de resistividade mais elevados ($> 2.502.5$) são interpretados como variações da composição mineralógica da Formação Furnas e possivelmente associados à concentração de materiais quartzosos. Valores de resistividade elétrica entre 2.502.5 e 837.5 ohm.m podem estar associados aos arenitos da Formação Furnas e a resistividades mais baixas (< 837.5 ohm.m) são interpretadas como pelitos da Formação Ponta Grossa.

As seções PL01, PL02 e PL03 foram executadas na área do lixão sob influência da disposição irregular de resíduos sólidos. A seção PL01 (Figura 7) apresenta um erro RMS de 1.38 depois de duas iterações. A porção mais resistiva ($> 4.167.5$ ohm.m), localizada na superfície nordeste, é interpretada como sedimentos secos inconsolidados. O decaimento na resistividade, entre 4.167.5 e

2.502.5 ohm.m, pode ser associado ao de solos residuais com influência da deposição de resíduos sólidos, enquanto a maior parcela da seção, com resistividade abaixo de 837.5 ohm.m, coincide com as estacas posicionadas sobre a área do lixão, interpretada como deposição de resíduos sólidos. A zona de resistividade anômala (mais resistiva) presente no centro do modelo geoeletrico pode indicar bolsões de gás metano, os quais são gerados pela decomposição dos resíduos orgânicos que se acumularam nos espaços vazios da deposição e da compactação dos resíduos sólidos inorgânicos.

O modelo geoeletrico PL02 (Figura 8) obteve RMS de 1.01 ao fim de duas iterações. Nessa seção, é possível observar o contato da deposição de resíduos relativa à zona com menor resistividade elétrica (< 837.5 ohm.m) com a geologia local na via de acesso, sem influência da disposição de resíduos sólidos. Valores de resistividade entre 837.5 e 1.670 ohm.m são interpretados como arenitos da Formação Furnas. A zona convexa com valores de resistividade acima de 2.505.5 ohm.m pode ser associada à possível variação da composição mineralógica associada à maior presença de materiais quartzosos, já a porção superficial ao sul da seção, com valores de resistividade elétrica também acima de 2.502.5 ohm.m, é interpretada como sedimentos arenosos e secos e inconsolidados.

A Figura 9 mostra o modelo PL03, que apresentou RMS de 1.00 depois de duas iterações. Nesta seção, é possível observar que sua quase totalidade apresenta valores de resistividade elétrica entre 837.5 e 1.670.0

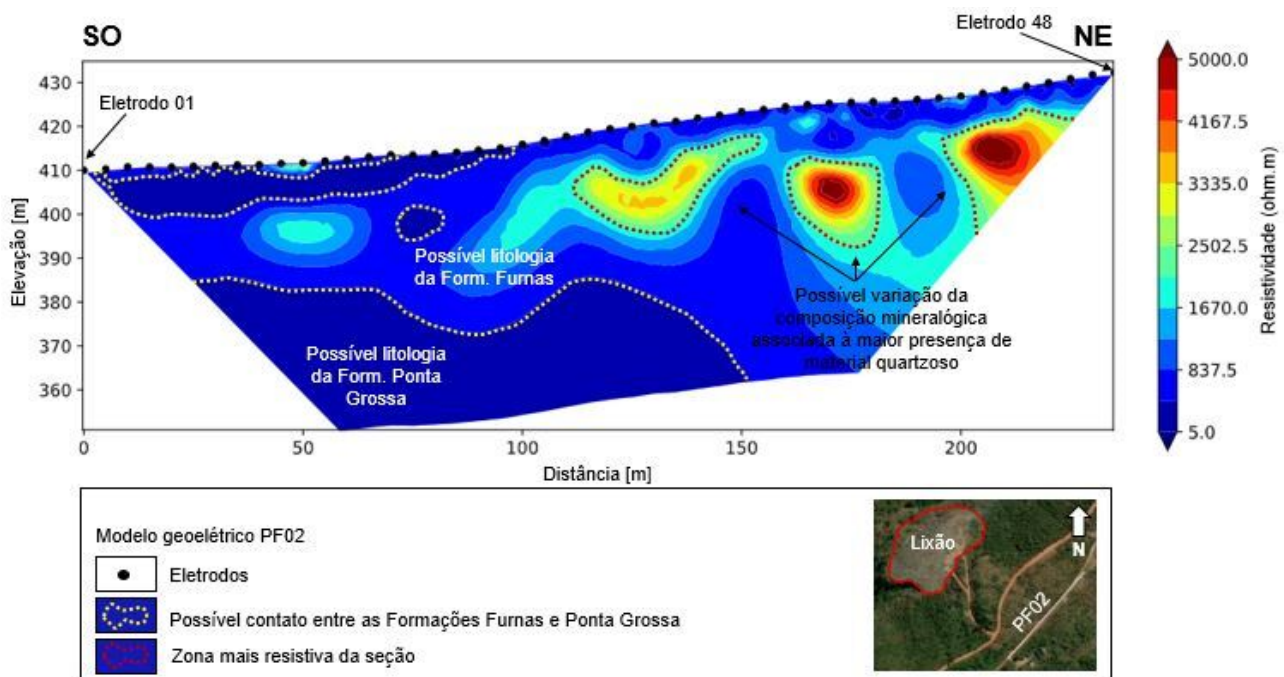


Figura 6. Modelo geoeletrico PF02.

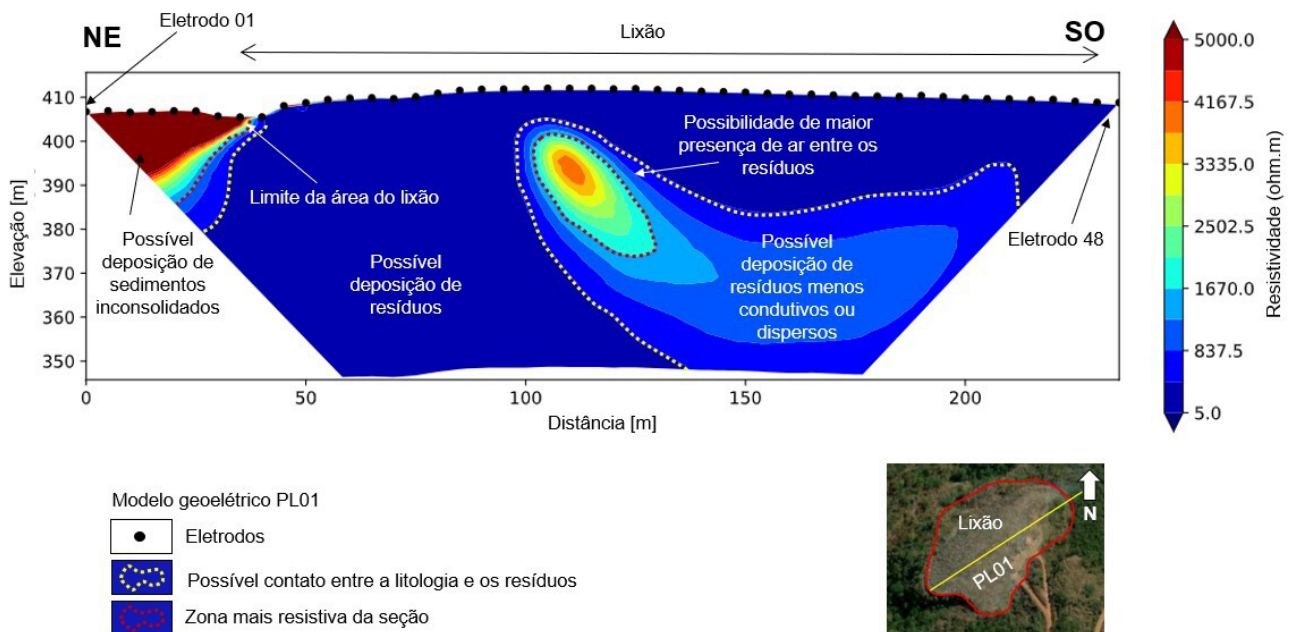


Figura 7. Modelo geológico PL01.

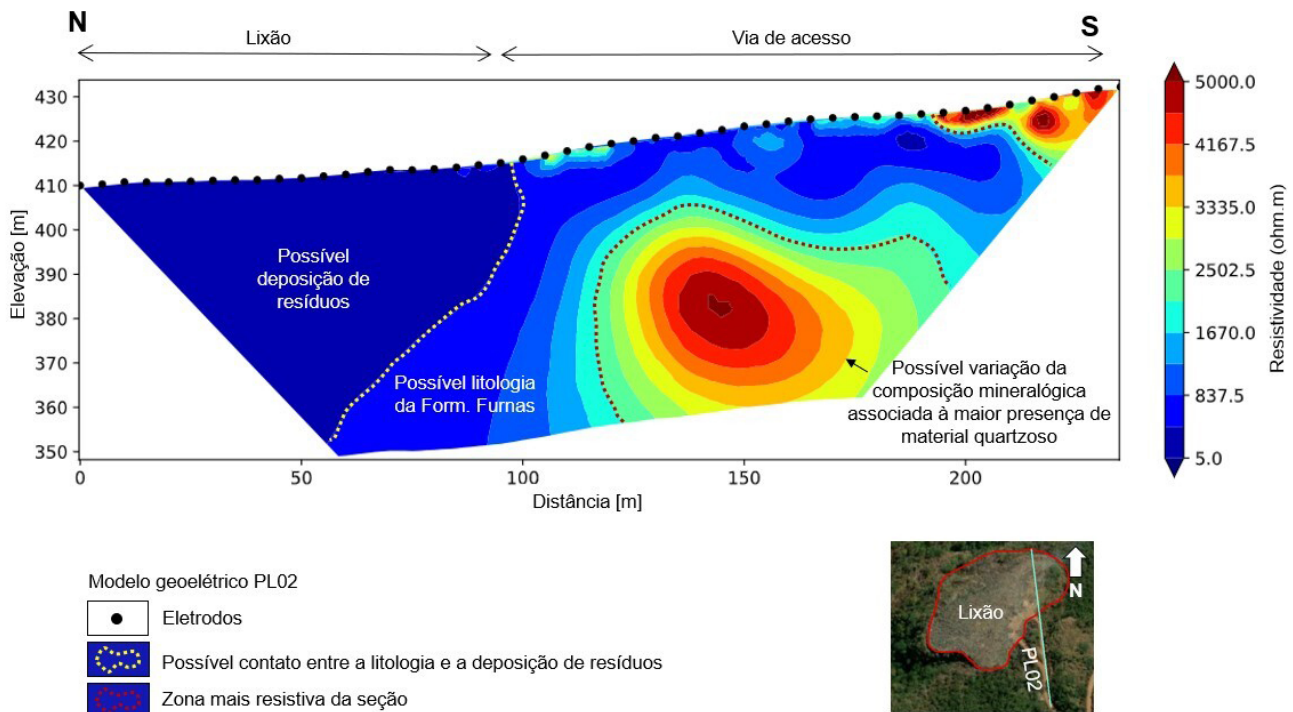


Figura 8. Modelo geológico PL02.

ohm.m associados à litologia local. A deposição de resíduos sólidos é, aparentemente, superficial e se concentra na porção noroeste da seção, possivelmente sobre rochas da Formação Furnas. Resistividades mais elevadas na superfície do modelo são interpretadas como deposição

de sedimentos inconsolidados, uma vez que coincidem com a via de acesso ao lixão.

As interpretações individualizadas em todas as seções de tomografia elétrica foram respaldadas pela disposição dos dados de maneira tridimensional e se mostraram condizentes.

A distribuição dos resultados das resistividades no terreno do lixão evidenciava valores eletricamente mais resistivos a montante da sua área (Figura 10). Esses valores são condizentes com os associados às rochas da Formação Furnas e com as vias de acesso ao lixão. Quando a área de deposição dos resíduos em superfície foi sobreposta no resultado 3D, as anomalias elétricas mais condutivas foram observadas justamente nessas áreas.

Observadas as anomalias elétricas mais condutivas na região de deposição dos resíduos, foram realizados cortes em diferentes níveis de profundidade no modelo tridimensional gerado a fim de identificar o comportamento das anomalias associadas ao material lixiviado. Quatro níveis de investigação, intervalados a cada 10 m, foram apresentados na Figura 11. No nível mais raso, 405 m de elevação, as anomalias foram identificadas

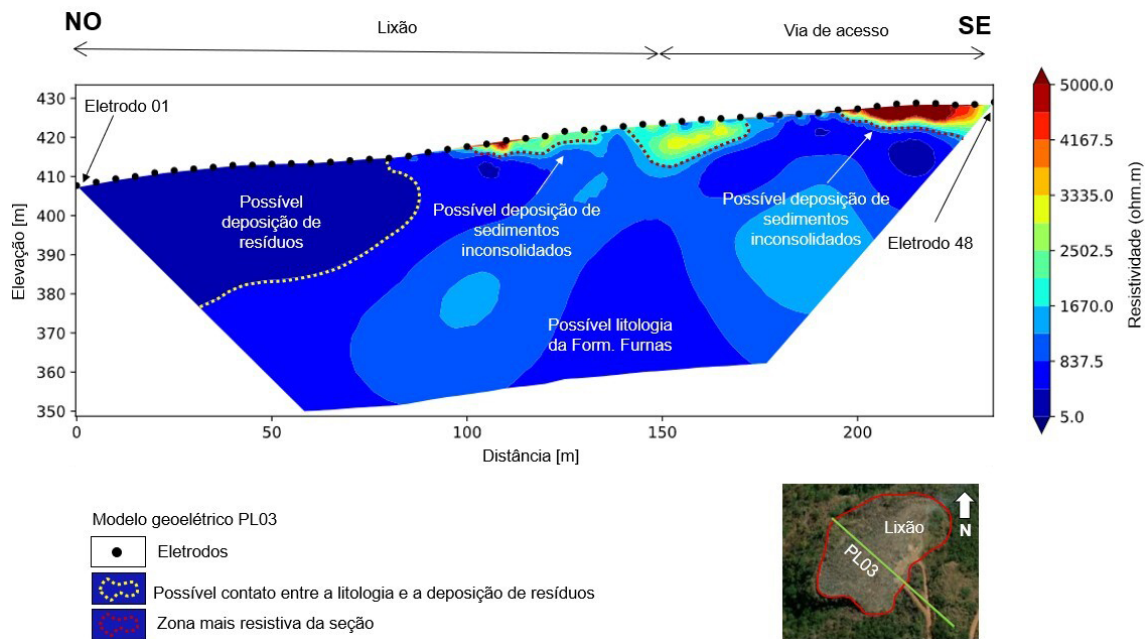


Figura 9. Modelo geoeétrico PL03.

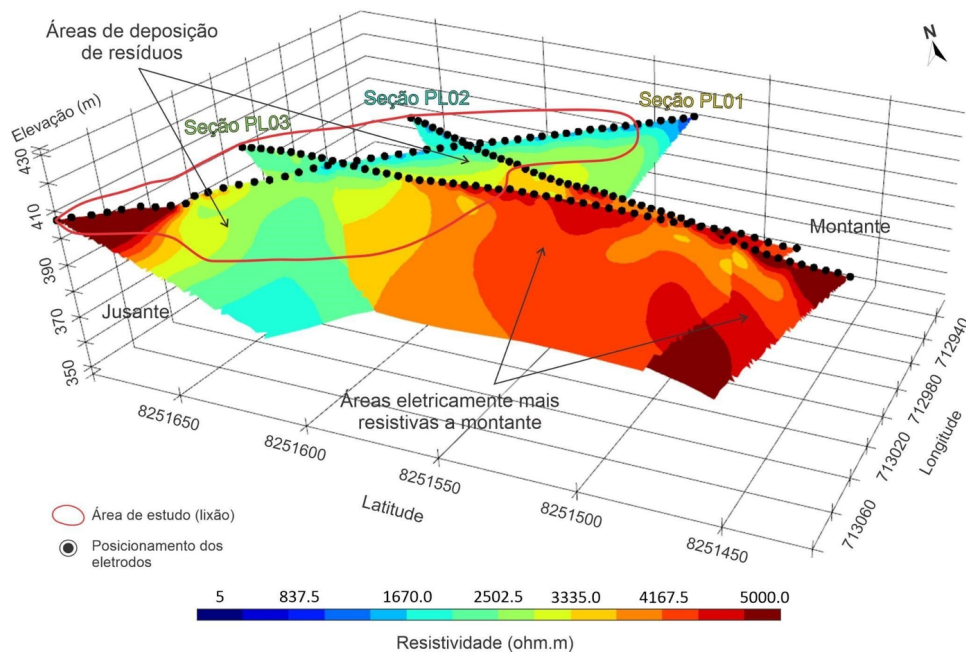


Figura 10. Disposição em 3D das seções de tomografia elétrica PL01, PL02 e PL03.

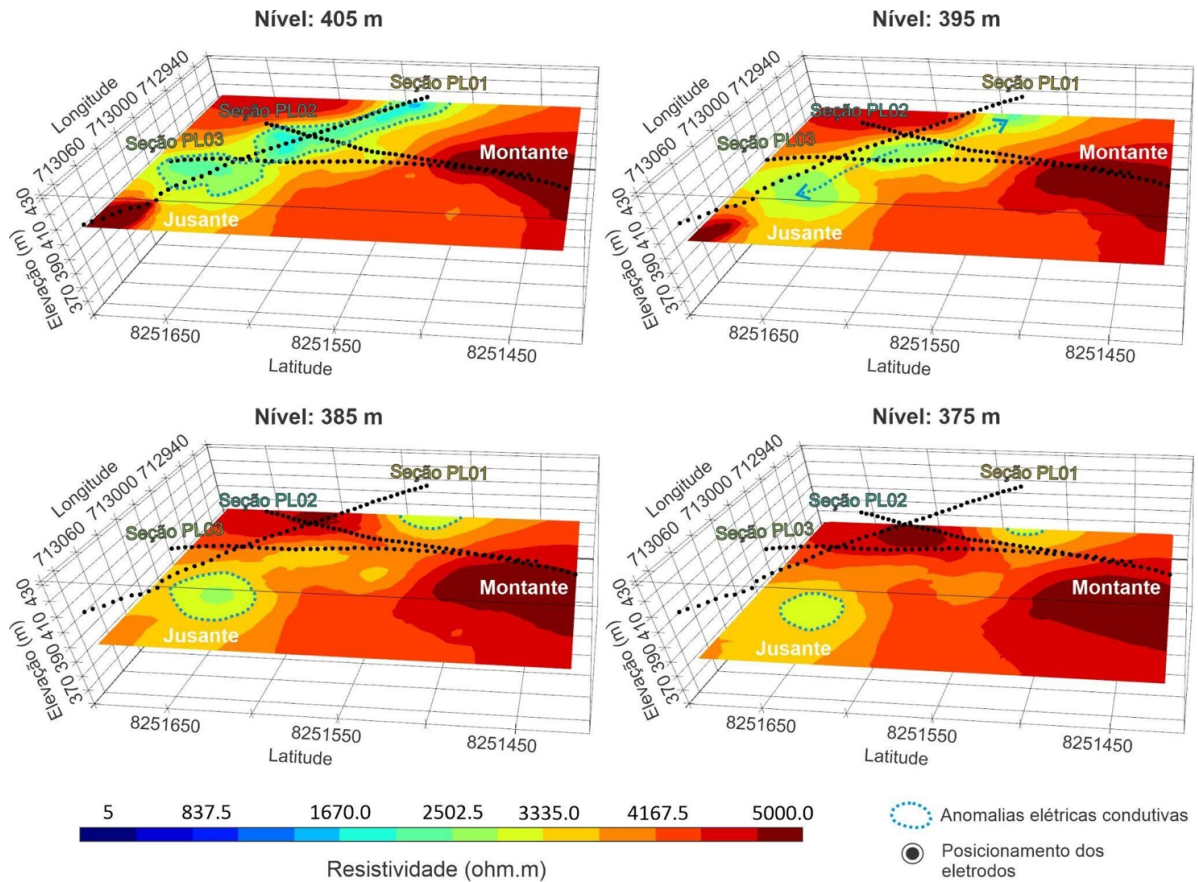


Figura 11. Diferentes níveis de investigação em profundidade a partir das seções de tomografia elétrica PL01, PL02 e PL03.

praticamente ao longo de toda a seção PL01, com exceção da região mais próxima à jusante, e foram condizentes com a disposição do lixo.

A região central da seção PL01 e início da seção PL02 estava inserida na região mais elevada topograficamente. Nesse ponto, foi observada a anomalia elétrica mais condutiva, e os cortes em profundidade mostraram um desenvolvimento das anomalias elétricas a partir desse ponto. Os cortes nas elevações de 395, 385 e 375 m apresentaram anomalias nas posições nordeste e sudoeste do modelo. Essa informação sugere que o desenvolvimento do lixiviado em profundidade nesse sentido é condizente com os aspectos fisiográficos da área de estudo.

CONCLUSÃO

Os dois perfis de *background* executados a montante, na via de acesso, possibilitaram relacionar valores de resistividades entre 1.670 e 875,5 ohm.m às formações Furnas e Ponta Grossa e, desta forma, os segmentos mais condutivos (< 875,5 ohm.m) foram interpretados como influenciados pela disposição de resíduos sólidos.

A relação entre maior condutividade e presença de resíduos sólidos deveu-se às características físico-químicas do lixo. As seções executadas na área do lixão foram interpretadas como contendo uma camada de resíduos superior a 60 metros de espessura. A interpretação dos dados sugere que não há presença de lixiviado, mas os valores de resistividade sugerem a hipótese de que há locais e determinadas profundidades em que o lixiviado pode estar presente ou mesmo que o contraste de resistividade entre a camada de resíduos e a formação geológica não tenha sido evidenciado.

Apesar das condições do local, as seções de tomografia elétrica justificaram sua eficiência na investigação de resíduos sólidos enterrados, pois as zonas com menores valores de resistividade elétrica coincidiram com a área de deposição de resíduos. A técnica permitiu diferenciar o material geológico dos resíduos depositados na área. Os resultados e as interpretações apresentados no estudo certamente facilitarão não só na determinação das melhores técnicas de investigações diretas a serem adotadas, mas também auxiliarão a quantificar as técnicas invasivas, por exemplo, a posição e o número de furos de sondagens necessários para o completo entendimento do contaminante na área de estudo.

REFERÊNCIAS

- Abreu Filho, W., Albuquerque, M. C. (2016). *Projeto geologia das folhas Dom Aquino-Rondonópolis: estado de Mato Grosso na escala 1:100.000*. Relatório Técnico. Goiânia: Serviço Geológico do Brasil (SGB- CPRM), 178 p.
- Assine, M. L., Soares, P. C., Milani, E. J. (1994). Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, 24(2), 77-89. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.19947789>
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). (1992). *NBR 8419/1992*. ABNT. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5816/nbr8419-apresentacao-de-projetos-de-ateros-sanitarios-de-residuos-solidos-urbanos-procedimento>. Acesso em: 13 nov. 2023.
- Astier, J. L. (1975). *Geofísica aplicada a la Hidrogeología*. Madri: Paraninfo, 344 p.
- Bizzi, D. F., Schobbenhaus, C., Gonçalves, J. H., Baars, F. J., Santos, J. O. S., Abram, M., Leão Neto, R., Matos, G. M. M. (2001). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: sistema de informação geográfica e mapas na escala 1:2.500.000*. Brasília: Serviço Geológico do Brasil – SGB-CPRM. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Recursos-Minerais/Apresentacao/Livro---Geologia%2C-Tectonica-e-Recursos-Minerais-do-Brasil-3489.html>. Acesso em: 24 jul. 2023.
- Blanchy, G., Saneiyani, S., Boyd, J., McLachlan, P., Binley, A. (2020). ResIPy, an intuitive open source software for complex geoelectrical inversion/modeling. *Computers and Geosciences*, 137, 104423. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104423>
- Bortolin, J. R. M., Malagutti Filho, W. (2009). Monitoramento temporal da pluma de contaminação em aterro controlado, na cidade de Rio Claro (SP), por meio do método da eletrorresistividade. *11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF*. Anais... Salvador: Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, p. 599-604.
- Braga, A. C. O. (2016). *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Brasil (1982). Departamento Nacional de Produção Mineral. *Folha SD.21 Cuiabá: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. Rio de Janeiro: DNPM. v. 26. (Levantamento de Recursos Naturais, 26). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=213269&view=detalhes>. Acesso em: 23 ago. 2023.
- Brasil (2002). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 303/2002*. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=299. Acesso em: 13 nov. 2023.
- Brasil (2008). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 404/2008. Disponível em: https://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_federal/leg_fed_resolucoes/leg_fed_res_conama/Resolu%C3%A7%C3%A3o-CONAMA-404-08-Aterros-Sanit%C3%A1rios.pdf. Acesso em: 13 nov. 2023.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2001). *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas*. São Paulo: CETESB, 389 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5584477/mod_resource/content/1/Manual%20Cetesb%20Completo_%C3%A1reas%20contaminadas.pdf. Acesso em: 23 ago. 2023.
- Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Bjerdrup, P. L., Jensen, D. L., Christensen, J. B., Baun, A., Albrechtsen, H.-J., Heron, G. (2001). Biogeochemistry of Landfill Leachate Plumes. *Applied Geochemistry*, 16(7-8), 659-718. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- Da Silva, J. E., Yokoyama, L. M. L., Borges, W. R., Elis, V. R., Hiodo, F. Y. (2007). Mapeamento tridimensional de pluma de contaminação através de resistividade elétrica. *10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. European Association of Geoscientists & Engineers, p. cp-172-00055. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.172.SBGF0055_07
- Da Silva, J. J. F., Migliorini, R. B. (2014). Caracterização das águas subterrâneas do aquífero furnas na região sul do estado de Mato Grosso. *Revista Geociências*, 33(2), 261-277. Disponível em: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/33/volume33_2.html. Acesso em: 24 jul. 2023.
- De Almeida Santos, A., Shiraiwa, S., Oliveira Silvino, A. N., Silva, W. T. P., Silva, N. A., Silveira, A., Migliorini, R. B. (2009). Comparação entre a investigação direta da água subterrânea e radar de penetração no solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiabá (MT). *Brazilian Journal of Geology*, 39(4), 769-772. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2009394768772>
- De Oliveira e Sousa, F. R., Borges, W. R., Cavalcanti, M. M., Stollberg, R. (2012). Verificação do comportamento sazonal de contaminantes subterrâneos através do imageamento

- elétrico 2D. *V Simpósio Brasileiro de Geofísica*. European Association of Geoscientists & Engineers, p. cp-341. <https://doi.org/10.13140/2.1.4173.7609>
- De Oliveira, M. T., Moreira, C. A., Anunciação, A. P. (2010). Aplicação do método da Eletrorresistividade em área de disposição de resíduos sólidos domiciliares. *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*. European Association of Geoscientists & Engineers. Brasília: SBGf, p. cp-197-00026. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.197.SBGF_2181
- Fachin, S. S., Elis, V. R., Borges, W. R., Lago, A. L., Souza, G. C. (2006). Modelagem elétrica 2D a partir de dados de eletrorresistividade do antigo Lixão de Ribeirão Preto-SP. *II Simpósio Brasileiro de Geofísica*. Natal: SBGf. p. cp-198-00071. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.198.SBGF134>
- Fitts, C. R. (2002). *Groundwater Science*. 2ª ed. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-62950-0>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D’Elia, M., Paris, M. (2002). *Proteção da qualidade da água subterrânea um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*. Washington, D.C.: Banco Mundial. No. 25071, 114 p. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/211991468005114562/pdf/250710REVISED01R01OFFICAL0USE0ONLY1.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2023.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (No. 629.1 F7). Disponível em: <https://fc79.gw-project.org/english/>. Acesso em: 24 jul. 2023.
- Gallas, J. D. F. (2000). *Principais Métodos Geoeletricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
- Griffiths, D. H., Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90005-J](https://doi.org/10.1016/0926-9851(93)90005-J)
- Hatae, M., Elis, V. R., Andrade, A. W. O. (2004). Aplicação de geofísica como subsídio para estudos de arqueologia do lixo. *I Simpósio Brasileiro de Geofísica*. São Paulo: SBGf. p. cp-216. <https://doi.org/10.22564/1simbgf2004.041>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). *Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação*. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>. Acesso em: 5 out. 2022.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021). *Base de Dados em formato Shapefile*. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 22 set. 2023.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2009). *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Lange, F. W., Petri, S. (1967). The Devonian of the Paraná Basin. *Boletim Paranaense de Geociências*, 21(22), 5-55. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/627c7c10-c5bf-4f6f-ad1e-72c8ec74811b/2241599.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology.
- Milani, E. J. (1997). *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 255 p.
- Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P. A., Fernandes, L. A., França, A. B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências — Petrobras*, 15(2), 265-287.
- MINFRA – Ministério dos Transportes (2021). *Base de Dados em formado KMZ*. MINFRA. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit-bit-mapas>. Acesso em: 22 set. 2023.
- Morales, G. P., Luiz, J. G., Mendes, R. L. R., Barradas, J. A. (2001). Delimitação da Pluma de Contaminação dos Resíduos Sólidos do Lixão do Aurá (Ananindeua/Pa) Por Imageamento Elétrico. *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Anais... p. cp-217-00059. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.217.059>
- Moreira, C. A., Braga, A. C. O., Martinelli, C. D. (2013). Investigação geofísica em aterro municipal de resíduos sólidos domiciliares, Cordeirópolis, Brasil. *Geotecnia*, 127, 105-116.
- Moreira, C. A., Helene, L. P. I., Nogara, P., Ilha, L. M. (2018). Analysis of leaks from geomembrane in a sanitary landfill through models of electrical resistivity tomography in South Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7180-x>

- Moreira, C. A., Munhoz, T., Cavallari, F., Helene, L. P. I. (2015). Electrical resistivity applied to detect zones of biogas accumulation in a landfill. *Geofísica Internacional*, 54(4), 353-362. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2015.54.4.1701>
- Moura, H. P., Malagutti Filho, W. (2003). Métodos de Eletroresistividade e de Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro, SP. *Geociências*, 22(N. Esp.), 129-139. Disponível em: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/22_especial/12.PDF. Acesso em: 25 jul. 2023.
- Netto, L. G., Malagutti Filho, W., Moreira, C. A., Donato, F., Helene, L. P. I. (2021). Delineation of necroleachate pathways using electrical resistivity tomography (ERT): Case study on a cemetery in Brazil. *Environmental Challenges*, 5, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100344>
- Netto, L. G., Muselli, A. B., Galli, V. L., Silva Pereira, J., Gandolfo, O. C. B., Birelli, C. A. (2020). Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds. *Journal of Applied Geophysics*, 178, 104049. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104049>
- Parasnis, D. S. (1986). *Principles of Applied Geophysics*. Berlim: Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4113-7>
- Prefeitura de Jaciara (2017). *Plano Municipal de Saneamento Básico*. Prefeitura de Jaciara. Disponível em: <https://www.jaciara.mt.gov.br/leis/96bf0b3927decf8a51e6bc0c3a766eef.pdf>. Acesso em: 22 set. 2023.
- Prefeitura de Jaciara (2020). *Perfil Econômico*. Prefeitura de Jaciara. Disponível em: <https://www.jaciara.mt.gov.br/perfil/>. Acesso em: 5 out. 2022.
- ResIPy (2022). *Programa de modelagem inversa Resipy, versão 3.3.3*. Disponível em: <https://hkex.gitlab.io/resipy/getting-started.html#citing-resipy>. Acesso em: 12 abr. 2022.
- Ross, J. L. S. (2014). Chapada dos Guimarães: borda da bacia do Paraná. *Revista do Departamento de Geografia*, 28, 180-197. <https://doi.org/10.11606/rdg.v28i0.525>
- Savino, A., Solórzano, G., Quispe, C., Correal, M. C. (2018). *Waste management outlook for Latin America and the Caribbean*. UNEP. Disponível em: <https://www.unep.org/ietc/resources/publication/waste-management-outlook-latin-america-and-caribbean>. Acesso em: 5 out. 2022.
- Shiraiwa, S., Lisovsky, S. P., Elis, V. R., Porsani, J. L., Borges, W. R. (2002). Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil: resultados preliminares. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(3), 181-186. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2002000300004>
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2019). *Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos*. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos-1/2019>. Acesso em: 25 jul. 2023.
- Soares, P. C. (1991). *Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná: controles*. Tese (Professor Titular). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 131 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1089.5842>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). Resistivity Methods. In: Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. *Applied Geophysics*, 2ª Ed. Cambridge: Cambridge University Press, p. 522-577. Disponível em: <https://kobita1234.files.wordpress.com/2016/12/telford-geldart-sheriff-applied-geophysics.pdf>. Acesso em: 26 set. 2023.
- Tiab, D., Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Waltham: Gulf Professional Publishing, 894 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03707-0>
- Vogelsang, D. (1994). *Environmental Geophysics: A Guide for Engineers, Scientists and Lawyers*. Hannover: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85141-4>
- Zhongming, Z., Linong, L., Xiaona, Y., Wangqiang, Z., Wei, L. (2016). *Report: Emerging Issues of Environmental Concern*. UNEP. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/frontiers-2016-emerging-issues-environmental-concern>. Acesso em: 5 out. 2022.