

Métodos geoeletricos na investigação exploratória do comportamento geotécnico de resíduos sólidos urbanos

Mariana Barbosa Juarez

Estudante de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, mariana.juarez@unesp.br

Giulliana Mondelli

Professor, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, g.mondelli@unesp.br

Heraldo Luiz Giacheti

Professor, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, h.giacheti@unesp.br

Vagner Roberto Elis

Professor, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, vagner.elis@iag.usp.br

RESUMO: Mais de uma década após a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ainda há desafios na promoção do gerenciamento integrado e sustentável – desde a separação na fonte até a disposição final – de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. A compreensão acerca do comportamento geotécnico dos RSU é essencial para evitar a ruptura de taludes e impactos no meio ambiente e na saúde pública durante o encerramento de lixões a céu aberto e aterros controlados e o monitoramento de aterros sanitários. Todavia, a heterogeneidade dos materiais é um obstáculo para a amostragem representativa e a reprodução das condições de campo em laboratório, principalmente no que se refere a variações volumétricas devido à decomposição da matéria orgânica e poropressões causadas pelo acúmulo de líquido e gás. Alternativamente, a relação entre a resposta geoeletrica e propriedades geotécnicas, como teor de umidade e porosidade, tem sido explorada na Geotecnia Ambiental. Esse artigo revisa dados elétricos e eletromagnéticos obtidos em estudos conduzidos no país para resíduos aterrados, bem como correlações com a distribuição de chorume e o estágio de degradação. No geral, a presença de RSU foi associada a valores baixos de resistividade ($<50 \Omega \cdot m$) e altos de cargabilidade (10-90 mV/V) em comparação com aqueles medidos no solo do entorno. As conclusões e limitações levantadas embasaram a proposta de uma abordagem metodológica para a investigação de áreas de disposição, incluindo métodos geofísicos não intrusivos em uma etapa exploratória que antecede a execução de furos de sondagem e ensaios de campo, entre outras ferramentas de prospecção geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro, Monitoramento, Chorume, Geofísica, Investigação In Situ.

ABSTRACT: More than a decade after the approval of the Brazilian Solid Waste Policy (PNRS), there are still challenges in promoting the integrated and sustainable management – from source separation to final disposal – of municipal solid waste (MSW) in Brazil. Understanding the geotechnical behavior of MSW is crucial for preventing slope failures and their impact on the environment and public health while closing open dumps and monitoring landfills. However, the heterogeneity of waste materials is an obstacle to representative sampling and reproducing field conditions in the laboratory, especially concerning volumetric variations due to organic matter decomposition and pore pressures caused by liquid and gas accumulation. Alternatively, the relationship between the geoelectrical response and geotechnical properties, such as moisture content and porosity, has been explored in Environmental Geotechnics. This paper reviews electrical and electromagnetic data obtained from studies conducted in the country for landfilled waste, as well as correlations with leachate distribution and degradation degree. Generally, the presence of MSW was associated with low resistivity ($<50 \Omega \cdot m$) and high chargeability (10-90 mV/V) values compared with those measured in the surrounding soil. The highlighted findings and limitations supported the suggestion of a methodological approach to investigate disposal sites, including non-intrusive geophysical methods in an exploratory stage preceding borehole drilling and in situ tests, among other geotechnical prospecting tools.

KEYWORDS: Landfill, Monitoring, Leachate, Geophysics, In Situ Investigation.

1 INTRODUÇÃO

A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem sido global e nacionalmente debatida há anos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para reduzir a geração de resíduos e garantir que somente os rejeitos sejam dispostos sobre o solo, em conformidade com normas operacionais e medidas de proteção cabíveis (Brasil, 2010). Um sistema que tem o aterro sanitário como única forma de destinação não é necessariamente sustentável; é imprescindível que sejam desenvolvidas soluções de reciclagem e valorização de RSU e se estabeleça um cenário econômico e logístico que as viabilize. Em paralelo, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) evidencia a necessidade de encerrar e recuperar áreas ocupadas por lixões a céu aberto e aterros controlados e de monitorar e descomissionar aterros sanitários existentes (Brasil, 2022), dado que tais áreas tem recebido os RSU coletados no país quase em sua totalidade – valor estimado entre 62 e 76 milhões de toneladas no ano de 2022 (Abrelpe, 2022; SNIS, 2022).

A caracterização de maciços e valas de resíduos, assim como do solo do entorno, é de suma importância nesse processo de adequação da disposição final e deve ser feita sob o ponto de vista da Geotecnia Ambiental, abrangendo tanto teorias da mecânica dos solos quanto ciclos biogeoquímicos, climáticos e hidrogeológicos (Jucá, 2019). Além da heterogeneidade dos materiais aterrados, as alterações que estes sofrem à medida que degradam trazem ainda mais complexidade à compreensão e à previsão do comportamento hidromecânico de estruturas de disposição. Cerca de 45% dos RSU gerados no Brasil consistem em restos de alimentos, jardins e madeiras (Abrelpe, 2020). O elevado teor de matéria orgânica, somado as condições quentes e úmidas típicas do país, resulta em um cenário favorável à decomposição com altas taxas de produção de chorume e biogás (Machado et al., 2014). Excessos de umidade e de poropressão podem reduzir a tensão efetiva e a resistência ao cisalhamento, têm sido atribuídos a vários casos de ruptura de taludes de resíduos (Gharabaghi et al., 2008; Zhang et al., 2020; Jucá et al., 2021).

A geofísica de superfície tem sido amplamente usada para avaliar áreas suspeitas de contaminação ou contaminadas por chorume, tendo em vista a relação de propriedades elétricas e eletromagnéticas com o teor de umidade, a porosidade e a salinidade do meio (Dahlin et al., 2010; Soupios e Ntarlagiannis, 2017; Igboama et al., 2022). Reunindo estudos conduzidos em diferentes regiões do mundo, principalmente Europa e América do Norte, Juarez et al. (2023) e De Donno et al. (2024) ressaltaram também a aplicabilidade dos métodos de eletrorresistividade (ER), polarização induzida (IP), potencial espontâneo (SP), eletromagnético (EM) e radar de penetração (GPR) para identificar zonas com acúmulo de chorume, anomalias indicativas de poros e bolsões e objetos enterrados (e.g. drenos) no interior da massa de resíduos, estimar a espessura dos sistemas de base e de cobertura e analisar esses aspectos a longo prazo.

O presente artigo apresenta uma revisão de escopo de estudos nacionais acerca da resposta geoeletrica de RSU. Esse tipo de pesquisa atende, entre outros propósitos, ao mapeamento de evidências e à estruturação de resultados de uma área de conhecimento multidisciplinar (Tricco et al., 2018). Considerando as vantagens em termos de custo-benefício, cobertura espacial e rapidez de execução, visa-se examinar como esses métodos geofísicos têm sido ou podem ser empregados para investigar áreas de disposição a fim de, posteriormente, auxiliar na determinação de propriedades geotécnicas e na interpretação de variações espaciais e temporais. A reconformação de taludes, a manutenção da integridade dos sistemas de drenagem, a instalação de marcos e a adoção de parâmetros confiáveis no monitoramento lixões, aterros controlados e aterros sanitários são medidas necessárias para que o resultado do encerramento seja um passivo sem riscos à saúde pública e ao ambiente e com condições mínimas para futuras implantações (Guimarães et al., 2021).

2 METODOLOGIA

A busca de estudos para inclusão na revisão foi realizada na base de dados Scopus, utilizando a seguinte expressão: ("*municipal solid waste*" OR *MSW* OR *waste*) AND (*landfill* OR "*open dump*" OR *dumpsite* OR *disposal*) AND ("*electrical resistivity*" OR *resistivity* OR "*induced polarization*" OR *chargeability* OR *self-potential* OR "*spontaneous potential*" OR *electromagnetic* OR "*ground penetrating radar*"). Terminologias alternativas e abreviações foram consideradas e não houve restrição quanto ao ano de publicação, idioma e tipo de documento. No total, 75 registros atenderam ao critério de inclusão de país/território. Durante a triagem de títulos e resumos, 24 registros foram removidos por não serem pertinentes à questão central, a exemplo de estudos que investigaram outros tipos de resíduos ou focaram na contaminação do solo. Em seguida, os demais estudos foram submetidos à avaliação do texto integral, quando disponível, para elegibilidade.

3 RESULTADOS

3.1 Características dos estudos

A Tabela 1 sumariza os dados extraídos de 18 estudos elegíveis para inclusão na revisão, publicados em periódicos e conferências entre os anos de 2002 e 2023. Foram identificadas 11 áreas de disposição, localizadas principalmente no Estado de São Paulo e em alguns estados das regiões Centro-Oeste e Sul. A presença notória de lixões e aterros controlados condiz com os quantitativos anuais disponibilizados por organizações públicas e privadas. Estima-se que entre 26% e 39% dos RSU coletados no país ainda tenham destinação inadequada (Abrelpe, 2022; SNIS, 2023).

Tabela 1. Resumo dos dados extraídos dos estudos elegíveis para inclusão na revisão

Nº	Área de disposição		Autor (ano)	Método				
	Cidade-UF	Descrição		ER	IP	SP	EM	GPR
1	Bauru-SP	Aterro sanitário	Lago et al. (2006)	Sim	Sim	Sim	–	–
2	Brasília-DF	Aterro controlado	Guedes et al. (2020)	Sim	–	–	–	–
3	Campinas-SP	Aterro sanitário	Aranda et al. (2021)	Sim	–	–	–	–
4	Cordeirópolis-SP	Aterro controlado	Moreira e Braga (2008)	–	Sim	–	–	–
			Moreira e Braga (2009a)	–	Sim	–	–	–
			Moreira e Braga (2009b)	Sim	Sim	–	–	–
			Moreira et al. (2009)	Sim	–	–	–	–
			Moreira et al. (2011)	Sim	–	–	–	–
			Moreira et al. (2013)	–	–	Sim	–	–
5	Cuiabá-MT	Lixão	Shiraiwa et al. (2002)	Sim	–	–	Sim	Sim
6	Piracicaba-SP	Aterro controlado	Moura e Malagutti Filho (2003)	Sim	Sim	–	–	–
7	Pirenópolis-GO	Lixão	Alves e Borges (2019)	–	–	–	–	Sim
8	Ribeirão Preto-SP	Lixão	Fachin et al. (2008)	Sim	Sim	–	–	–
9	Rio Claro-SP	Aterro sanitário	Moreira et al. (2015)	Sim	–	–	–	–
			Moreira et al. (2017)	–	–	Sim	–	–
10	São Carlos-SP	Lixão	Elis et al. (2016)	Sim	Sim	–	–	–
			Morita et al. (2023)	Sim	–	–	–	–
11	Vila Nova do Sul-RS	Aterro sanitário	Helene e Moreira (2021)	Sim	–	Sim	–	–

3.2 Resposta geométrica de RSU no Brasil

O método ER foi o mais usado nos estudos avaliados, destacando-se duas técnicas e seus respectivos objetivos: sondagem elétrica vertical (SEV) com arranjo Schlumberger para delimitar a espessura das camadas de cobertura, de resíduos e de base; e caminhamento elétrico (CE) com arranjo dipolo-dipolo para determinar a variação vertical (profundidade) e lateral de parâmetros de interesse. Guedes et al. (2020) compararam linhas de CE com quatro arranjos e o dipolo-dipolo demonstrou maior compatibilidade com as informações em furos de sondagem. O método IP foi o segundo mais frequente, empregando-se geralmente o mesmo arranjo do ER.

Os resultados de resistividade (ρ) e cargabilidade (M) encontram-se na Tabela 2. Embora as práticas operacionais, a idade dos RSU e os métodos adotados sejam diferentes em cada área, notam-se intervalos de valores similares. No geral, os maciços e as valas de disposição apresentaram valores mais baixos de ρ , devido à natureza altamente condutiva do chorume, e mais altos de M em comparação com aqueles obtidos no entorno (Lago et al., 2006; Fachin et al., 2008). Zonas com ρ acima de $100 \Omega.m$ no interior do aterro sanitário de Rio Claro-SP, situadas próximas de drenos de gás com vazão maior que $40 m^3/h$, foram associadas ao acúmulo de biogás (Moreira et al., 2015). Nos casos em que não houve contraste suficiente de resistividade, o fenômeno da polarização – medido em termos de cargabilidade ou cargabilidade normalizada pela resistividade (Mn) – foi mais sensível à presença de resíduos e, portanto, mais eficiente para delimitá-los (Moura e Malagutti Filho, 2003; Elis et al., 2016). As anomalias de cargabilidade podem ser ocasionadas por objetos metálicos aterrados, tais como latas e eletrônicos, e por elementos metálicos oriundos do chorume (Moreira e Braga, 2008, 2009a, 2009b).

Tabela 2. Valores de resistividade e cargabilidade obtidos para RSU em estudos no Brasil

Área de disposição Nº	Status ^a	Autor (ano)	Técnica	Arranjo	ρ (Ω .m)	M (mV/V)
1	Operando	Lago et al. (2006)	SEV	Schlumberger	10-19	–
			CE	Dipolo-dipolo	4-40	10-26
2	Desativada	Guedes et al. (2020)	CE	Vários	<20	–
3	Operando	Aranda et al. (2021)	SEV	Schlumberger	2-51	–
			CE	Dipolo-dipolo	3-40	–
4	Desativada ^b	Moreira et al. (2009)	CE	Dipolo-dipolo	<300	–
		Moreira et al. (2011)	SEV	Schlumberger	26-189	–
5	Desativada	Shiraiwa et al. (2002)	SEV	Schlumberger	5	–
			EM	–	6-17	–
6	Operando	Moura e Malagutti Filho (2003)	SEV	Schlumberger	2-15	8-43
8	Desativada	Fachin et al. (2008)	CE	Dipolo-dipolo	3-25	15-50
9	Operando	Moreira et al. (2015)	CE	Schlumberger	<141	–
10	Desativada	Elis et al. (2023)	CE	Dipolo-dipolo	<30	40-90
11	Desativada ^b	Helene e Moreira (2021)	CE	Schlumberger	12-50	–

Legenda: ^a Referente ao período do levantamento geofísico; ^b Vala(s) de resíduos fechada(s).

Aranda et al. (2021) examinaram a distribuição de umidade no aterro sanitário Delta-A em Campinas-SP, adotando a simplificação da lei de Archie (1942) descrita nas Equações 1 e 2, que substitui a porosidade e a saturação pelo teor de umidade volumétrico (θ). A resistividade do chorume (ρ_1) foi medida em piezômetros e os parâmetros a e m foram calibrados a partir de correlações entre valores de ρ de SEVs e teores de umidade obtidos em laboratório com amostras do local. Convertendo seções de CE em seções de umidade, os autores distinguiram uma camada de geossintéticos na base da célula experimental e zonas mais úmidas acima dela.

$$\rho = a \times \rho_1 \times \theta^{-m} \quad (1)$$

$$\rho = 0,725 \times 1,03 \times \theta^{-2,092} \quad (2)$$

Morita et al. (2023) avaliaram a eficiência de um sistema de geomembranas para reduzir a infiltração de águas pluviais e a produção de chorume no lixão desativado de São Carlos-SP. Ao comparar linhas de CE antes (período seco) e depois (período úmido) da instalação, verificou-se um aumento da resistividade na área sob influência da cobertura. Fora dos limites dessa área, os valores de ρ foram nitidamente mais baixos após a incidência de chuvas. No levantamento de Aranda et al. (2021), a ausência desse efeito da condição climática (i.e. diminuição da resistividade devido ao aumento da umidade durante o período chuvoso) foi atribuída a influência da biodegradação sobre o parâmetro elétrico.

Moreira et al. (2011) fizeram uma estimativa do tempo de formação de chorume no aterro controlado de Cordeirópolis-SP. Observou-se uma queda da resistividade de SEVs de 144 para 26 Ω .m em valas fechadas de 2007 a 2004 – estando essa última no ápice de produção do fluido –, seguida por um aumento até 189 Ω .m na vala fechada em 2001. Contudo, a interpretação de linhas de CE sobre a mesma área, junto com parâmetros geoquímicos do solo de interface com os RSU, mostrou-se mais controversa. Tendências de redução de ρ e do potencial hidrogeniônico (pH) e aumento do potencial redox (Eh) entre 2007 e 2004 também indicaram uma evolução das atividades de decomposição, enquanto valores significativamente mais altos de ρ e baixos de Eh na vala fechada em 2003 sugeriram a interrupção desse processo, cuja causa levantada foi a precipitação de íons e consequente instabilidade geoquímica do ambiente (Moreira et al., 2009).

O método SP também se mostrou conveniente para avaliar o estágio de degradação dos resíduos. Ainda no aterro de Cordeirópolis-SP, Moreira et al. (2013) detectaram um aumento do potencial elétrico de 0 a 70 mV em valas mais antigas. Potenciais elétricos baixos ou negativos, como aqueles vistos nos aterros sanitários de Rio Claro-SP e Vila Nova do Sul-RS, devem-se à presença de matéria orgânica biodegradável e ao potencial de oxirredução em RSU mais novos (Moreira et al., 2017; Helene e Moreira, 2021).

No que tange aos métodos eletromagnéticos, condutividades entre 60 e 180 mS/m (resistividades entre 17 e 6 Ω .m, respectivamente) foram medidas na área de disposição e, nos poucos dados de GPR, notou-se a atenuação ou ausência de refletores na presença de chorume (Shirawa et al. 2003; Alves e Borges, 2019).

3.3 Abordagem proposta

A Figura 1 ilustra uma proposta metodológica para a caracterização geotécnica de RSU dispostos em lixões a céu aberto, aterros controlados e aterros sanitários, subdividida em: (1) investigação exploratória; (2) formulação de problemas e hipóteses; (3) investigação confirmatória; e (4) análise integrada dos dados.

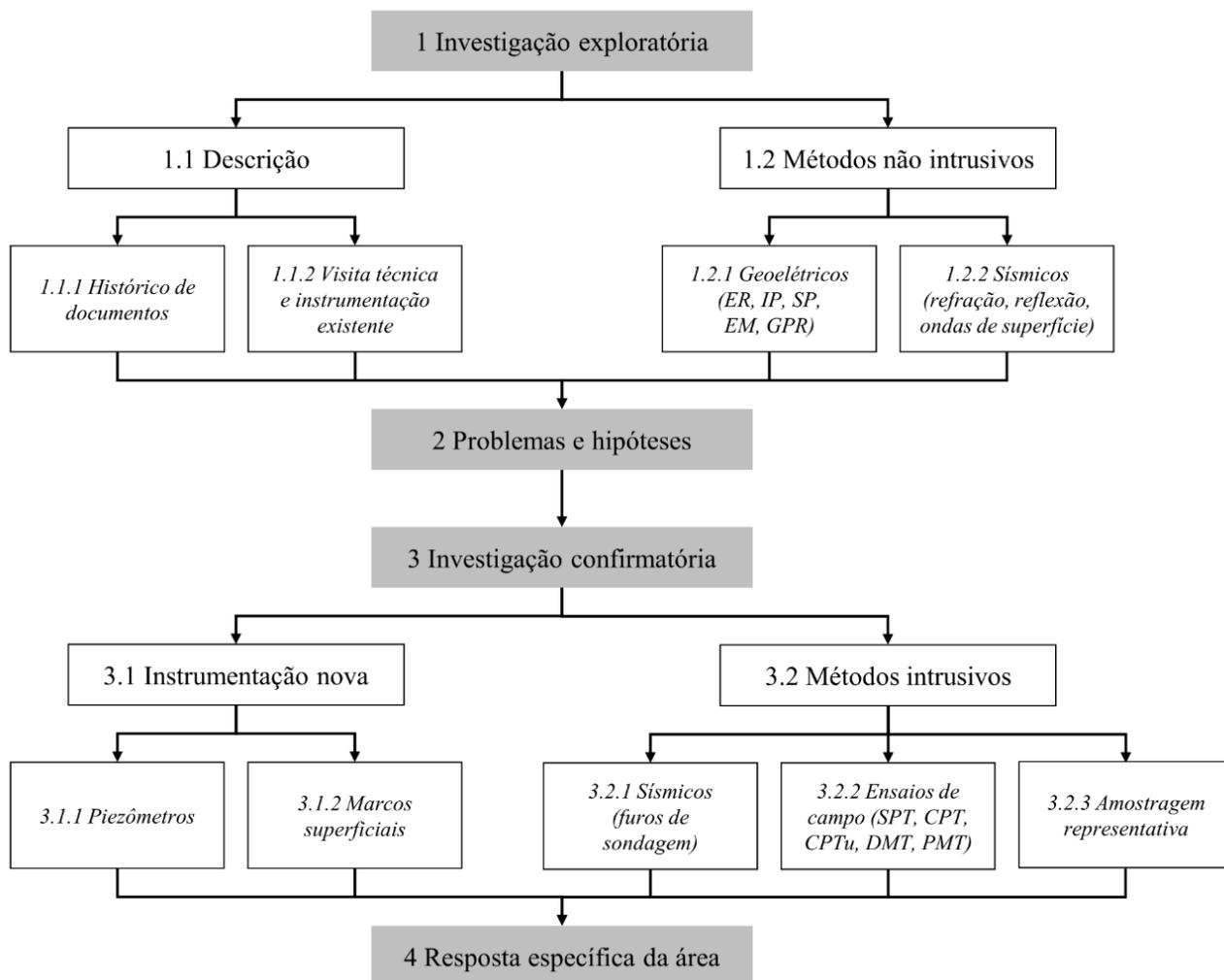


Figura 1. Abordagem metodológica para a caracterização geotécnica de áreas de disposição final de RSU

A investigação exploratória não requer uma hipótese *a priori*; ao contrário, visa-se mapear e diagnosticar os resíduos de forma rápida, menos onerosa e sem a necessidade de perfurações. Nessa etapa, destacam-se as seguintes sugestões práticas elencadas por Meju (2000): busca e inspeção de documentos prévios; descrição do histórico construtivo e operacional, dos materiais de impermeabilização e sistemas de drenagem de chorume e biogás, se houver, e da hidrogeologia; planejamento e execução de um levantamento geofísico superficial; e desenvolvimento de modelos geoeletricos e/ou sísmicos específicos. Recomenda-se a combinação de métodos e o posicionamento de linhas de aquisição de dados dentro e fora dos limites da área de disposição para reduzir ambiguidades na interpretação de zonas anômalas e evidenciar o contraste entre os materiais.

Em seguida, prossegue-se para a identificação de problemas geotécnicos existentes ou potenciais e de hipóteses a serem testadas na investigação confirmatória. Uma vez em posse das regiões e profundidades de interesse, sugere-se a instalação de piezômetros e marcos superficiais, métodos geofísicos intrusivos (furos de sondagem), ensaios de campo e amostragem. Espera-se que a avaliação conjunta dessas informações forneça estimativas mais confiáveis de parâmetros para análises de estabilidade e permita a adaptação ou a geração de modelos de previsão de comportamento mais adequados para resíduos.

4 CONCLUSÃO

O uso de métodos geofísicos no monitoramento geotécnico de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, durante a operação e o encerramento, mostra-se promissor. A resposta geoelétrica do meio relaciona-se indiretamente com a distribuição de líquidos e gases e o processo de degradação. Estes, por sua vez, afetam o comportamento mecânico e deformacional das estruturas a médio e longo prazo.

Estudos nacionais conduzidos nos últimos anos indicaram a predominância de zonas menos resistivas e mais polarizáveis no interior dos RSU em comparação com o solo do entorno. Frequentemente, encontraram-se valores de resistividade abaixo de 50 Ω .m, compatíveis com os elevados teores de umidade causados pela decomposição e pela infiltração de águas pluviais, e valores de cargabilidade entre 10 e 90 mV/V, associados à composição dos materiais e do chorume. Foram relatadas tendências de aumento do potencial elétrico com o envelhecimento dos resíduos e uma consequente redução da parcela biodegradável.

No entanto, ressalta-se que a interpretação desses dados requer validação ou calibração com informações prévias da área de estudo e/ou parâmetros determinados em laboratório. A variação de propriedades elétricas e eletromagnéticas depende de diversos fatores e não implica necessariamente relações claras de causa e efeito. Por fim, identificam-se oportunidades de pesquisa a partir da abordagem proposta para investigação *in situ*.

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrelpe (2020). *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil*. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: 15. fev. 2024.
- Abrelpe (2022). *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil*. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>> Acesso em: 15. fev. 2024.
- Alves, K. L., Borges, W. R. (2019). Estimativa de características geométricas de solos e rochas com radar de penetração no solo, na área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Pirenópolis, Goiás, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42 (3), p. 281-288.
- Aranda, N., Elis, V. R., Prado, R. L., Miguel, M. G., Leme, M. A. G., Conicelli, B., Guzmán, O. (2021). Electrical resistivity methods to characterize the moisture content in Brazilian sanitary landfill. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, p. 1-15.
- Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- Brasil (2022). Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- Dahlin, T., Rosqvist, H., Leroux, V. (2010). Resistivity-IP for landfill applications. *first break*, 28 (8), p. 101-105.
- De Donno, G., Melegari, D., Paoletti, V., Piegari, E. (2024). Electrical and electromagnetic prospecting for the characterization of municipal waste landfills: a review. In: Anouzla, A., Souabi, S. (eds) *Technical Landfills and Waste Management*. Springer Cham. v. 1, p. 1-29.
- Elis, V. R., Ustra, A. T., Hidalgo-Gato, M. C., Pejon, O. J., Hiodo, F. Y. (2016). Application of induced polarization and resistivity to the environmental investigation of an old waste disposal area. *Environmental Earth Sciences*, 75, p. 1-13.
- Fachin, S. J. S., Elis, V. R., Ustra, A. T. (2008). Resistivity and IP 2D surveying at an old landfill site in Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil: acquisition parameters evaluation and environmental monitoring. In: 21st

Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems - SAGEEP, Philadelphia. *Proceedings...* EAGE, p. 862-870.

- Gharabaghi, B., Singh, M. K., Inkratas, C., Fleming, I. R., McBean, E. (2008). Comparison of slope stability in two Brazilian municipal landfills. *Waste Management*, 28 (9), p. 1509-1517.
- Guedes, V. J. C. B., Lima, V. B. O., Borges, W. R., Cunha, L. S. (2020). Comparison of the geoelectric signature with different electrode arrays at the Jockey Club Landfill of Brasília, DF, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, 38 (1), p. 41-51.
- Guimarães, C. C., Barbosa, A. M., Macedo, L. S. (2021). Proposta metodológica para o encerramento e recuperação de áreas de disposição irregular de resíduos sólidos. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, 5 (18), p. 6-22.
- Helene, L. P. I., Moreira, C. A. (2021). Analysis of leachate generation dynamics in a closed municipal solid waste landfill by means of geophysical data (DC resistivity and self-potential methods). *Pure and Applied Geophysics*, 178 (4), p. 1355-1367.
- Igboama, W. N., Hammed, O. S., Fatoba, J. O., Aroyehun, M. T., Ehiabhili, J. C. (2022). Review article on impact of groundwater contamination due to dumpsites using geophysical and physiochemical methods. *Applied Water Science*, 12 (6), p. 130.
- Juarez, M. B., Mondelli, G., Giacheti, H. L. (2023). An overview of in situ testing and geophysical methods to investigate municipal solid waste landfills. *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (9), p. 24779-24789.
- Jucá, J. F. T. (2019). Geotecnia ambiental aplicada a depósitos de resíduos sólidos: investigação ambiental, projetos e controle tecnológico de obras. *15ª Palestra Milton Vargas*. ABMS.
- Jucá, J. F. T., Norberto, A. D. S., Santos Júnior, J. I. D., Marinho, F. A. (2021). Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow and slope stability. *Soils and Rocks*, 44 (3), e2021067321.
- Lago, A. L., Elis, V. R., Giacheti, H. L. (2006). Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, p. 357-374.
- Machado, S., Karimpour-Fard, M., Carvalho, M. F., Villar, O. M., Santos, A. C. (2014). MSW characteristics and landfill performance in tropical regions. *International Journal of Civil Engineering*, 12 (3), p. 238-250.
- Meju, M. A. (2000). Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied geophysics*, 44 (2-3), p. 115-150.
- Moreira, C. A., Braga, A. C. O. (2008). Aplicação do método de polarização induzida em aterro controlado. *Geociências*, 27 (2), p. 219-227.
- Moreira, C. A., Braga, A. C. O. (2009a). Anomalias de cargabilidade em aterro de resíduos sólidos domiciliares. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27, p. 55-62.
- Moreira, C. A., Braga, A. C. O. (2009b). Decomposição de resíduos sólidos domiciliares e variações na resistividade e cargabilidade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27, p. 401-409.
- Moreira, C. A., Braga, A. C. O., Fries, M. (2009). Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27, p. 283-293.
- Moreira, C. A., Braga, A. C. O., Godoy, L. H., Sardinha, D. D. S. (2013). Relationship between age of waste and natural electric potential generation in Sanitary Landfill. *Geofísica internacional*, 52 (4), p. 375-383.
- Moreira, C. A., Braga, A. C. O., Hansen, M. A. F. (2011). Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Brazilian Journal of Geology*, 41, p. 549-557.
- Moreira, C. A., Helene, L. P. I., Cavallari, F., Carrazza, L. P., Dourado, J. C. (2017). Analysis of rainfall influence in biogas production and variations in the self-potential in a landfill. *Geociências*, 36 (3), p. 589-597.

- Moreira, C. A., Munhoz, T., Cavallari, F., Helene, L. P. I. (2015). Electrical resistivity to detect zones of biogas accumulation in a landfill. *Geofísica internacional*, 54 (4), p. 353-362.
- Morita, A. K., Pelinson, N. S., Bastianon, D., Saraiva, F. A., Wendland, E. (2023). Using electrical resistivity tomography (ERT) to assess the effectiveness of capping in old unlined landfills. *Pure and Applied Geophysics*, 180 (10), p. 3599-3606.
- Moura, H. P., Malagutti Filho, W. (2003). Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de Rio Claro, SP. *Geociências*, 22, p. 129-139.
- 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, p. 181-186.
- SNIS (2022). Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos*. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos-snis>> Acesso em: 15 fev. 2024.
- Soupios, P., Ntarlagiannis, D. (2017). Characterization and monitoring of solid waste disposal sites using geophysical methods: current applications and novel trends. In: Sengupta, D., Agrahari, S. (eds) *Modelling Trends in Solid and Hazardous Waste Management*. Springer, p. 75-103.
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W. et al. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. *Annals of internal medicine*, 169 (7), p. 467-473.
- Zhang, Z., Wang, Y., Fang, Y., Pan, X., Zhang, J., Xu, H. (2020). Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. *Waste Management & Research*, 38 (12), p. 1389-1404.