



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID31682>



Tomografia de resistividade elétrica e sísmica de refração na avaliação de encostas: o caso da Encosta do Mirante, Guarujá-São Paulo

Electrical resistivity tomography and seismic refraction in slope assessment: the case of Mirante Slope, Guarujá-São Paulo

Cleber de Jesus Santos¹; Jefferson de Lima Picanço²; Otávio Coaracy Brasil Gandolfo³; Marcelo César Stangari⁴; Julia Vieira Santo⁵; Luca Lämmle⁶

¹ Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências/Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Campinas/SP, Brasil. Email: c264746@dac.unicamp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5450-2004>

² Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências/Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Campinas/SP, Brasil. Email: jeffepi@unicamp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1631-1818>

³ Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Unidade de Negócio Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente, Cidade/São Paulo/SP, Brasil. Email: gandolfo@ipt.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2883-0463>

⁴ Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/Departamento de Geofísica, São Paulo/SP, Brasil. Email: cesar.stangari@iag.usp.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6020-6048>

⁵ Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências/Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Campinas/SP, Brasil. Email: j238364@dac.unicamp.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9947-1245>

⁶ Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências/Departamento de Geografia, Campinas/São Paulo, Brasil/SP, Brasil. Email: lucalamlle@ige.unicamp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6668-3914>

Resumo: A ocorrência de escorregamentos em regiões serranas devido as chuvas vêm motivando intensas discussões acerca da busca por mecanismos de monitoramento dos processos hidrológicos em escala de detalhe. A geofísica desponta como uma metodologia alternativa na superação deste desafio, dada a sua praticidade na obtenção dos dados, resolução espacial, relação custo/benefício, para além de utilizarem métodos não invasivos. Assim, o objetivo da pesquisa consiste em explorar as potencialidades do uso combinado do método de Sísmica de Refração com a Tomografia de Resistividade Elétrica na avaliação de encostas associadas a escorregamentos, sobretudo a partir de contextos climáticos distintos. Para tal, foi realizada uma caracterização do regolito através de ambas os métodos. Adicionalmente executou-se um monitoramento da encosta em dois cenários climatológicos distintos, período seco e chuvoso. Na oportunidade, serão apresentados também os aspectos relativos às correlações entre as informações das tomografias para compreender a dinâmica da água-regolito. A combinação de métodos possibilitou identificar as condições hidrológicas da subsuperfície investigada de forma abrangente, seja no topo, no material escorregado e na base da encosta. A combinação do método geoeletrico, capaz de mapear a saturação no solo, aliado ao método sísmico de refração, capaz de identificar horizontes com propriedades mecânicas diferentes, permitiu uma interpretação mais segura e detalhada do subsolo, a exemplo de estruturas associadas a movimentação do solo, bem como anomalias de baixa resistividade na forma de bolsões, possivelmente relacionadas ao vazamento na rede de transmissão da estação de tratamento de água. Além disso a estratégia metodológica permitiu identificar na base da encosta a influência da cunha salina. Considerando o constatado benefício proveniente da combinação de ambos os métodos apresentados, acredita-se que o incremento de informações de geofísica no monitoramento geotécnico, pode colaborar de forma decisiva melhoria na compreensão dos mecanismos de instabilização de encosta.

Palavras-chave: Tomografia de Resistividade Elétrica; Sísmica de Refração; Deslizamentos de Terra; Serra do Mar.

Abstract: The occurrence of landslides in mountainous regions due to rainfall has been motivating intense discussions about the search for mechanisms to monitor hydrological processes at a detailed scale. Geophysics emerges as an alternative methodology in overcoming this challenge, given its practicality in obtaining data, spatial resolution, and cost/benefit ratio, besides using non-invasive methods. Thus, the objective of this research is to explore the potential of the combined use of the Refraction Seismic method with Electrical Resistivity Tomography in the evaluation of slopes associated to landslides, especially from different climatic contexts. For this purpose, the regolith was characterized using both methods. Additionally, the slope was monitored in two different climatological scenarios, dry and rainy periods. In this opportunity, the aspects related to the correlations between the tomography information to understand the water-regolith dynamics will also be presented. The combination of methods made it possible to identify the hydrological conditions of the investigated subsurface in a comprehensive way, either at the top, in the slipped material, or at the base of the slope. The combination of the geoelectric method, capable of mapping the saturation in the soil, combined with the refraction seismic method, capable of identifying horizons with different mechanical properties, allowing for a more secure and detailed interpretation of the subsurface, for example, structures associated with soil movement, as well as low resistivity anomalies in the form of pockets, possibly related to the leakage in the transmission network of the water treatment plant. In addition, the methodological strategy allowed the identification at the base of the slope of the influence of the salt wedge. Considering the benefits of the combination of both methods, it is believed that the increase of geophysical information in geotechnical monitoring can contribute decisively to improve the understanding of slope instability mechanisms.

Keywords: Electrical Resistivity Tomography; Seismic Refraction; Landslides; Serra do Mar.

Recebido: 02/03/2023; Aceito: 04/09/2023; Publicado: 15/03/2024.

1. Introdução

Os estudos geofísicos aplicados à caracterização de encostas vêm sendo desenvolvidos a partir de diversas metodologias (BOGOSLOVSKY *et al.*, 1977; PALMER; WEISGARBER, 1988; MCCANN; FORSTER, 1990; GÖKTÜRKLER *et al.*, 2008; IMANI, 2021; SANTOS *et al.*, 2021; LÄMMLE *et al.*, 2022a; LÄMMLE *et al.*, 2022b). As investigações de detalhe a partir da combinação de métodos geofísicos estão inseridas neste contexto e tem relevância significativa para melhor compreender o fenômeno de nucleação de escorregamentos (CRAWFORD; BRYSON, 2018). O desafio geotécnico na avaliação de áreas com escorregamentos está associado tanto à complexidade geológica, devido a movimentação e mistura de camadas, quanto às limitações operacionais na profundidade de investigação e no acesso à totalidade da área por conta do relevo escarpado. Assim, as inspeções geotécnicas têm requisitado métodos geofísicos para superação destes desafios, tendo em vista a constatada capacidade de imagear extensas áreas de forma contínua e com resolução satisfatória, tanto lateralmente quanto em profundidade de forma prática. Para suprir as limitações e complementar a análise geotécnica, os métodos indiretos têm sido cada vez mais empregados, a exemplo da geofísica (ISMAIL; TAIB; ABAS, 2019; PICANÇO *et al.*, 2019) que se apresenta nestes casos como uma metodologia eficaz, na medida em que possui capacidade de investigar o regolito com resolução espaço-temporal acurada e precisa.

Os métodos geofísicos permitem investigar extensas áreas através de medidas contínuas no regolito, tanto lateralmente quanto em profundidade. Sendo uma metodologia pouco destrutiva, a geofísica não necessita de numerosas perfurações e coletas de amostras (BURGER; SHEEHAN; JONES, 2006). A evolução dos instrumentos e das técnicas de aquisição têm possibilitado a coleta de volumes expressivos de dados com precisão satisfatória, assim como o constante aprimoramento da capacidade computacional, que tem proporcionado um tratamento matemático cada vez mais avançado, obtendo imagens de alta resolução e proporcionando avaliações de maior detalhe (JONGMANS and GARAMBOIS, 2007). Em contrapartida, a abordagem geofísica possui limitações relacionadas a possíveis ambiguidades na interpretação dos resultados, inviabilizando a caracterização precisa do meio geológico. Tal fato pode ser solucionado com a combinação adequada de técnicas e/ou, também, com o auxílio de métodos diretos como furos de sondagem, mapeamento geológico, entre outros.

O método da Sísmica de Refração consiste na investigação da subsuperfície a partir da análise das ondas refratadas nas camadas geológicas. A velocidade das ondas é sensível às variações propriedades físicas do meio como densidade e parâmetros elásticos (razão de Poisson, módulos de volume e cisalhamento, etc.). Com isso é possível estimar composição do sedimento, porosidade, saturação de água, além de parâmetros geotécnicos como escarificabilidade (KEAREY, 2002; KAMINSKY, 2013). Já o método da Eletroresistividade se baseia na distribuição da resistividade elétrica dos materiais geológicos em subsuperfície. Por meio dela é possível identificar com precisão a distribuição do teor de água, saturação, estruturas e litotipos sem a necessidade de amostragem e reconhecimento direto (LEHMANN *et al.*, 2013; BRAGA, 2016).

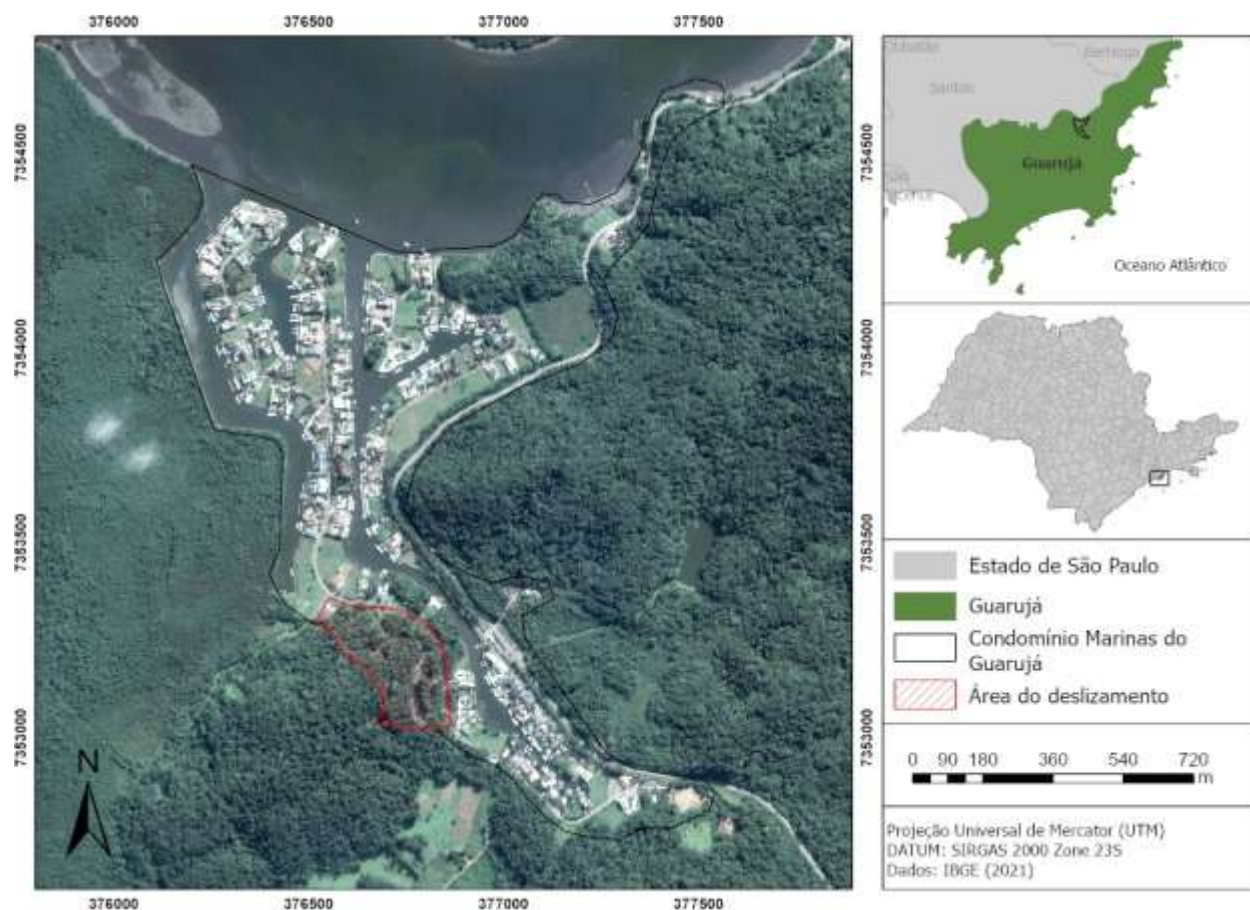
Entende-se que o uso combinado de métodos geofísicos aprimora a capacidade de interpretação das imagens, melhorando a capacidade de distinção de estruturas geológicas impossíveis de serem visualizadas com uma única metodologia (HACK, 2000). A proposta de combinar método de refração e a Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT) busca melhorar a precisão e segurança no diagnóstico, além de resolver possíveis problemas associados a ambiguidade, como comumente ocorre em áreas afetadas pelos deslizamentos de terra devido a heterogeneidade geológica, (BARTA *et al.*, 2005). Neste cenário as discussões realizadas a partir da combinação de métodos, das aquisições semiautomatizadas, bem como do uso de modernas técnicas de processamento de dados geofísicos, cresceram consideravelmente e vem colaborando no avanço do tema. A literatura sobre o uso integrado de métodos geofísicos na avaliação de encostas no Brasil ainda é incipiente.

O estudo consiste no uso conjunto da Sísmica de Refração e da Tomografia de Resistividade Elétrica em encostas associadas a escorregamentos no município de Guarujá/SP. Foram executadas duas campanhas de aquisição (período seco e chuvoso), em cada campanha foram obtidas 4 linhas de caminhamento elétrico (CE) com espaçamentos de 3 e 5m, além de uma terceira campanha para o levantamento de 4 linhas de sísmica de refração (SR) com espaçamentos de 10m entre os geofones. A partir daí foi estabelecido uma análise integrada das técnicas para estabelecer discussões acerca da identificação e distinção entre os materiais geológicos no interior do regolito, monitoramento da distribuição de domínios de saturação. Entende-se que, embora exista um número significativo de pesquisas sobre a temática, poucas procuraram identificar evidências por meio da integração de métodos geofísicos.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de Estudo

A área de estudo está situada na escarpa florestada de um morro isolado nas imediações do condomínio Marinas do Guarujá, no bairro Cidade Jardim Tom, Guarujá-SP, (coordenadas UTM 276691.157E e 7353271.514N DATUM–SIRGAS2000/Zona 23K), região que se destaca na Baixada Santista no que se refere às atividades turísticas (Figura 1).



O relevo do município do Guarujá é composto predominantemente composta por áreas de planície, associadas a morros isolados com altitude máxima de 320m e declividade média em torno de 30% (CORSI; MACEDO, 2016). O compartimento de vertentes tem sido alvo de intensa ocupação urbana nas últimas décadas, e consequentemente o desmatamento, os processos erosivos, contribuindo para deflagração dos deslizamentos de terra (CORSI; MACEDO, 2016). O contexto geológico do município de Guarujá envolve a presença de gnaisses, granitos e metassedimentos da Faixa Ribeira (TUPINAMBÁ, 2012). O substrato da área de estudo é representado por paragneisses, gnaisses peraluminosos, biotita gnaiss, rochas calcissilicáticas (IPT, 2020). Em geral estes litotipos citados são recobertos por regolitos espessos com granulometria mais fina, predominantemente argilosa, mais micáceos (Figura 2).

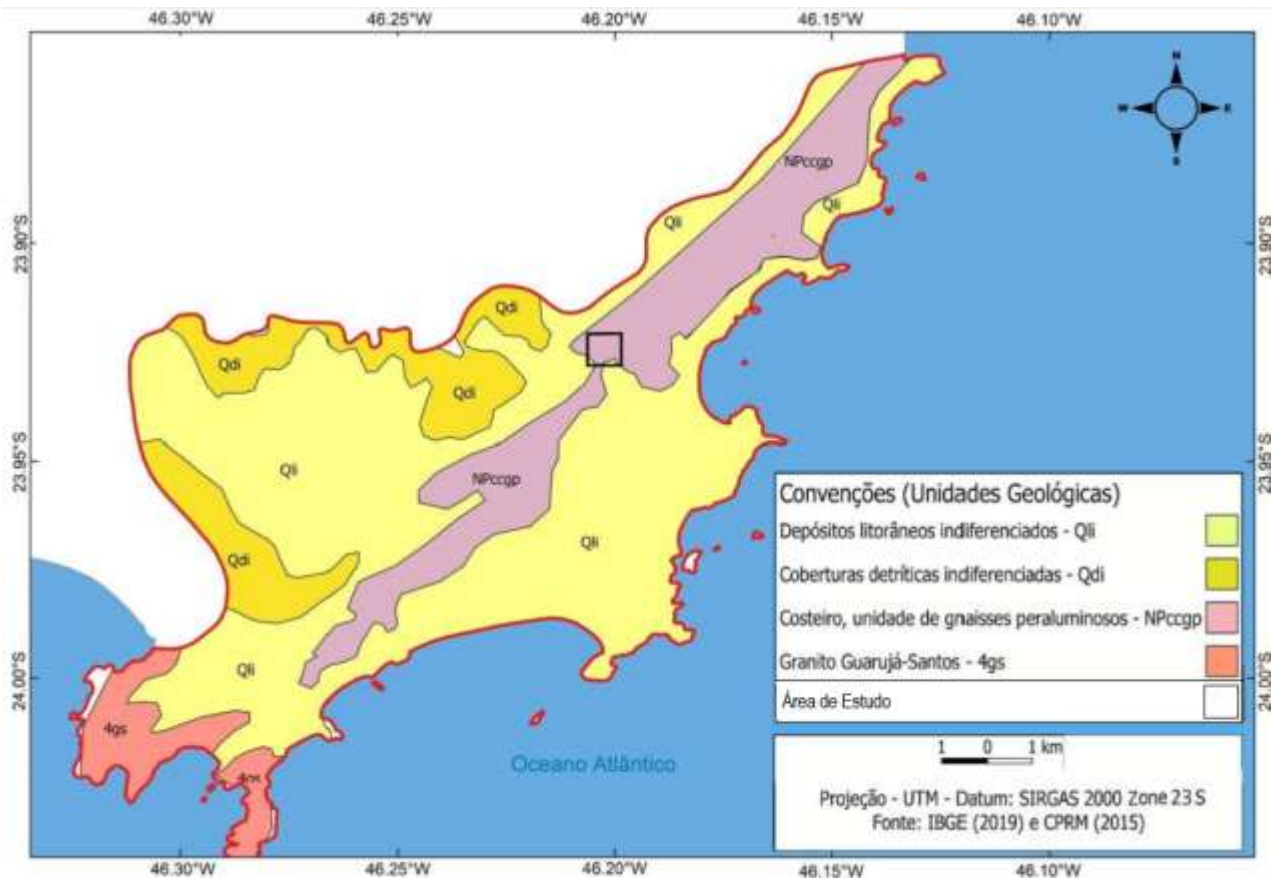


Figura 2 – Principais unidades geológicas do município do Guarujá-SP.

Fonte: Autoria própria.

2.2. Sísmica de Refração

A refração consiste no fenômeno associado à mudança de direção e velocidade de uma onda quando passa de um meio menos denso para um meio mais denso. Desta forma, a sísmica de refração consiste no método de investigação das propriedades físicas do meio geológico através da medida, processamento e interpretação do tempo de chegada da onda sísmica refratada em subsuperfície (CARDARELLI, 2002). Nos trabalhos realizados foi feito o uso da sísmica de refração para complementar os dados de tomografia de resistividade elétrica., enquanto o método de eletrorresistividade consegue identificar a distribuição de água com boa sensibilidade, a sísmica de refração, feita com onda S, mapeia a distribuição da velocidade na matriz sólida das camadas geológicas, pois a onda S é relativamente insensível à presença de água.

Considere um modelo de duas camadas geológicas (1 e 2), contendo uma fonte emissora de ondas S e um receptor conforme figura 3a abaixo. Para que a refração ocorra, é necessário que a velocidade onda sísmica, na camada 2, seja maior que a velocidade da camada 1 (Figura 3a). A sísmica de refração utiliza os tempos de trânsito das primeiras chegadas nos receptores posicionados a partir de uma certa distância crítica ($X_{\text{crítico}}$) da fonte de energia. Essa pode ser observada na Figura 3b, que relaciona a distância *offset* (fonte – receptor) com o tempo de percurso da onda, no qual percebe-se que após o $X_{\text{crítico}}$ (Figura 3b) a onda refratada passa a frente da onda direta que viaja com velocidade do meio V_1 .

Considerando um modelo de duas camadas de interfaces horizontais, a Lei de Snell pode ser expressa como $\sin \theta = \frac{v_1}{v_2}$ ou $\cos \theta = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$, o tempo de percurso total (t) de uma onda sísmica criticamente refratada numa camada inferior ao longo da trajetória ABCD (Figura 3a) é dado por:

$$t = \frac{x}{v_2} + \frac{2z \cos(\theta_c)}{v_1} \quad [1]$$

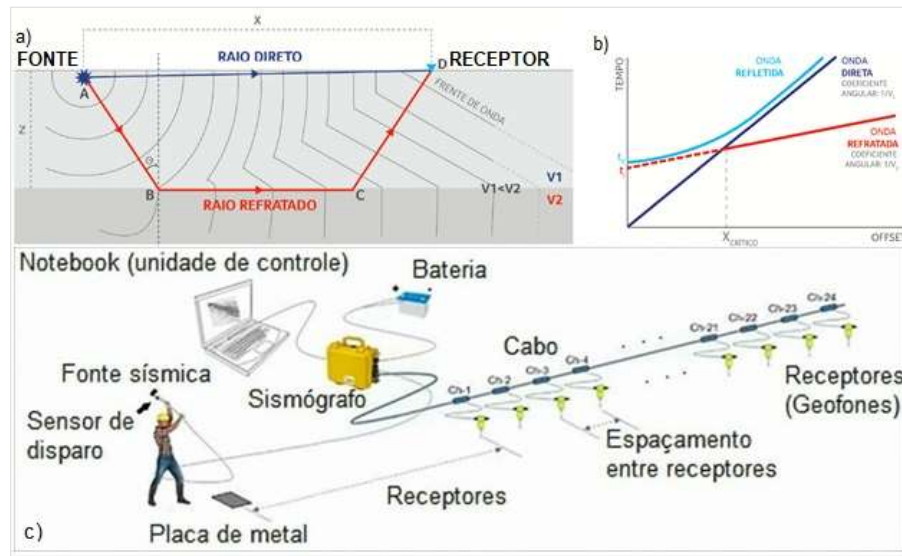


Figura 3 – a) Esquema representativo do fenômeno da sísmica de refração considerando um modelo de duas camadas. b) Relação do tempo de percurso das ondas sísmicas com a distância da fonte ao receptor. c) Esquema representativo do levantamento de sísmica de refração.

Fonte: Adaptado de HGI, 2023.

Na figura 3c temos um esquema representativo dos equipamentos básicos utilizados no campo para a coleta dos dados de sísmica de refração. A técnica utiliza uma marreta de 5kg conectada a um sensor de disparo que produz uma fonte de ondas sísmica. Os 24 geofones de componente horizontal com frequência natural de 28Hz foram espaçados em 4m, associado a um *offset* com a mesma distância, formando uma base sísmica de 100m, para registrar o tempo de chegada da onda refratada. O sinal foi gravado no sismógrafo, modelo Geode (*Geometrics*) 24 canais, na forma de tiros sísmicos, ou seja, o registro dos tempos de chegada dos 24 receptores. Por fim o dado passou por um pré-processamento com a aplicação de ganhos e filtros (no domínio da frequência, inverso, de velocidade). Para a etapa do processamento utilizou-se o software *SeisImager SW* para retirada de ruídos e inversão, obtendo assim o modelo de velocidade com a profundidade.



Figura 4 – a) Levantamento dos dados geofísicos(a) Linha 1; (b) Linha 2; (c) Linha 3.
Fonte: Autoria própria.

No planejamento da aquisição dos dados, foram levados em consideração os seguintes aspectos operacionais: i) dimensionar a área de interesse; ii) observar a profundidade de investigação requerida, sendo que a capacidade do método é estimada em 1/5 do comprimento da linha de investigação; iii) estimar a quantidade adequada de canais para garantir uma boa resolução horizontal (CARDARELLI, 2002). O arranjo de campo utilizado na coleta de dados de sísmica de refração consistiu no posicionamento dos *offsets* de tiro em uma linha paralela aos geofones. Já a fonte foi posicionada a uma distância aproximada de metade do intervalo entre os geofones (Figura 3c).

2.3. Tomografia de Resistividade Elétrica (ERT)

O método da eletrorresistividade consiste em uma forma de investigação geofísica que se baseia no mapeamento da distribuição da resistividade elétrica (ρ) em subsuperfície. Esse tipo de investigação ocorre por meio da injeção de corrente elétrica contínua ou de frequência muito baixa através de dois eletrodos (A e B), seguido da medição da diferença de potencial (ΔV) entre dois eletrodos regularmente espaçados (M e N) (Figura 3). Os princípios físicos do método estão fundamentados na teoria da eletricidade e do eletromagnetismo (KIRSCH; YARAMANCI, 2006; LOKE, 2016). Segundo Ward (1990), para uma fonte pontual injetando uma corrente de intensidade I no interior de um semi-espaço condutor homogêneo e isotrópico de resistividade, representando uma terra plana, o potencial elétrico num ponto de observação P, distante r do eletrodo fonte, é dado por:

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad [2]$$

Como a função potencial é uma grandeza escalar, o potencial total das diversas fontes, pode ser obtido adicionando as contribuições de cada fonte de forma separada. Aplicando esse princípio ao quadripolo, a diferença de potencial entre os pontos M e N, gerados pela injeção de correntes nos pontos A e B, é dada por:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad [3]$$

Onde,

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad [4]$$

Ou ainda,

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad [5]$$

Na qual k é denominado de fator geométrico do arranjo, pois depende unicamente da disposição relativa dos eletrodos no terreno. A equação é utilizada para calcular a resistividade de um meio homogêneo e isotrópico. Mas, na prática, pela natureza heterogênea da rocha, o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo. Desse modo, a leitura realizada pelo equipamento representa a resistividade considerando um meio homogêneo, por isso a resistividade encontrada é dita aparente. Este parâmetro representa o resultado das medidas de alguns dos métodos geoeletricos (BRAGA, 2006). Para meios heterogêneos e/ou anisotrópicos, a resistividade assim calculada varia com a posição e/ou orientação do arranjo de eletrodos (GANDOLFO, 2007).

Na aquisição das medidas também se estabelece o arranjo experimental adequado aos objetivos estabelecidos. O procedimento de coleta dos dados foi realizado segundo o arranjo Dipolo-Dipolo. A escolha desse tipo de arranjo se deve à possibilidade de realizar leituras tanto lateralmente quanto em profundidade, opção útil por oferecer praticidade e dinamismo na coleta de dados (BRAGA, 2016; GANDOLFO, 2007), para além de ser um dos métodos que melhor identifica variações laterais de resistividade. No arranjo Dipolo-Dipolo a investigação ocorre ao longo de linhas numa direção fixa, onde os eletrodos de corrente (AB) e de potenciais (MN) possuem espaçamento constante (Figura 4). Cada distância (R) entre os centros dos pares de eletrodos (AB e MN) corresponde a uma profundidade de investigação. Por fim, as medidas são realizadas aumentando a distância (R) proporcionalmente no sentido do caminhamento para fazer a varredura da resistividade e da polarização induzida do solo (Figura 4).

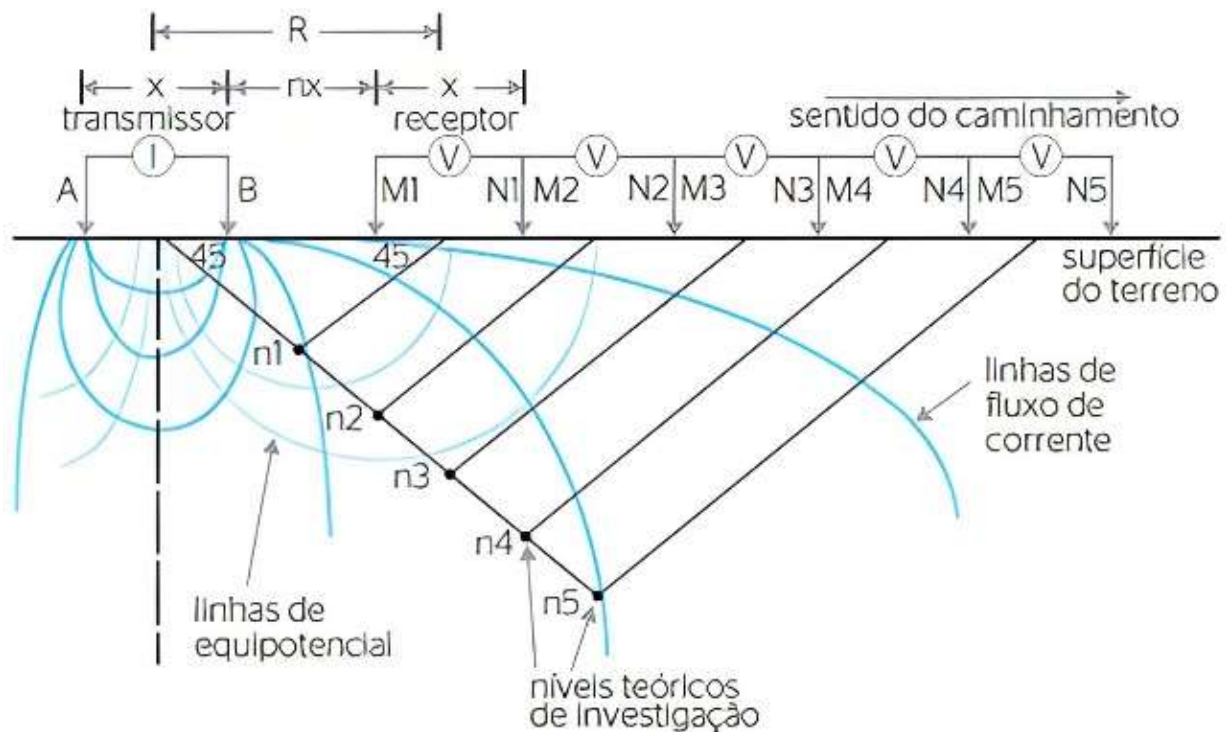


Figura 4 – a) Esquema ilustrativo do arranjo Dipolo-dipolo utilizado no campo.

Fonte: Autoria própria.

A tomografia consiste em caminhamento elétrico automatizado no qual obtém-se um número de medição consideravelmente maior que um caminhamento convencional. A execução deste tipo de caminhamento requer equipamentos de alta tecnologia com os quais é possível realizar medições de forma automatizada. Em virtude do processamento de um grande volume de dados, a tomografia oferece imagens com alta resolução espacial (CHAMBERS *et al.* 2014; WHITELEY, 2019). A aplicação da Tomografia de Resistividade Elétrica no contexto dos problemas geotécnicos, como os escorregamentos, tem o propósito de identificar aspectos hidrogeológicos dos materiais em subsuperfície através da produção de uma imagem elétrica bidimensional. Através desta podemos obter informações sobre saturação, fraturamentos ou cavidades, e condutividade hidráulica.

Os dados de eletrorresistividade (ER) foram coletados por meio do sistema Rho/IP, composto por um resistímetro modelo Syscal R2 atuando como receptor, com 10 canais, que opera juntamente a um transmissor de corrente elétrica conectado a um conversor DC/DC de 250 W e a uma bateria de 12 V. Os dados foram adquiridos por meio da técnica de caminhamento elétrico de forma semiautomática com o arranjo dipolo-dipolo duas formas diferentes, sendo uma com 5m e outra com 3m de espaçamento entre os eletrodos. O equipamento possui um painel de controle que permite a pré-visualização dos dados em campo e os ajustes na configuração do aparelho. O hardware dispõe de uma unidade de armazenamento interno dos dados, também de uma entrada para a transferência dos dados adquiridos em campo. O tratamento dos dados de resistividade foi realizado com o software Res2Dinv que, por sua vez, consistiu nas etapas de pré-processamento, inversão e modelagem em 2D.



Figura 5 – a) Sistema Rho/IP utilizado no caminhamento elétrico, 1(receptor), 2(emissor), 3(conversor DC/DC), 4(bateria). b) Levantamento dos dados na Linha 4.

Fonte: Autoria própria.

2.3. Amostragem e Delineamento Experimental

Os procedimentos metodológicos foram organizados em 3 etapas. A primeira etapa, destinada ao reconhecimento preliminar da área, delimitação do recorte espacial do estudo e fixação dos pontos de coleta de dados. A segunda etapa, referente a aquisição dos dados em campo, etapa esta subdividida em duas fases: levantamento sísmico e levantamento geoeletrico. Na terceira etapa foi destinada ao processamento e a interpretação dos dados.

Para avaliar os materiais geológicos em subsuperfície foram executadas linhas de caminhamento elétrico, bem como sísmica de refração, em linhas de monitoramento posicionadas para o estudo (Figura 6). As medidas foram realizadas durante o final do período seco no mês de setembro no ano de 2022. A malha de amostragem catalogada para a pesquisa é composta por 4 linhas [Linhas 1 (L1); Linha 2 (L2); Linha 3 (L3); Linha 4 (L4)], localizados no topo da encosta (L1 e L2), na material escorregado (L3) e na base da encosta (L4) (Figura 6). A quantidade e distribuição das linhas estabelecidas baseou-se na geometria da encosta, atentando para os critérios da amostragem regular, de modo que foi possível investigar adequadamente o topo da encosta, a os materiais coluvionares e a base da encosta.

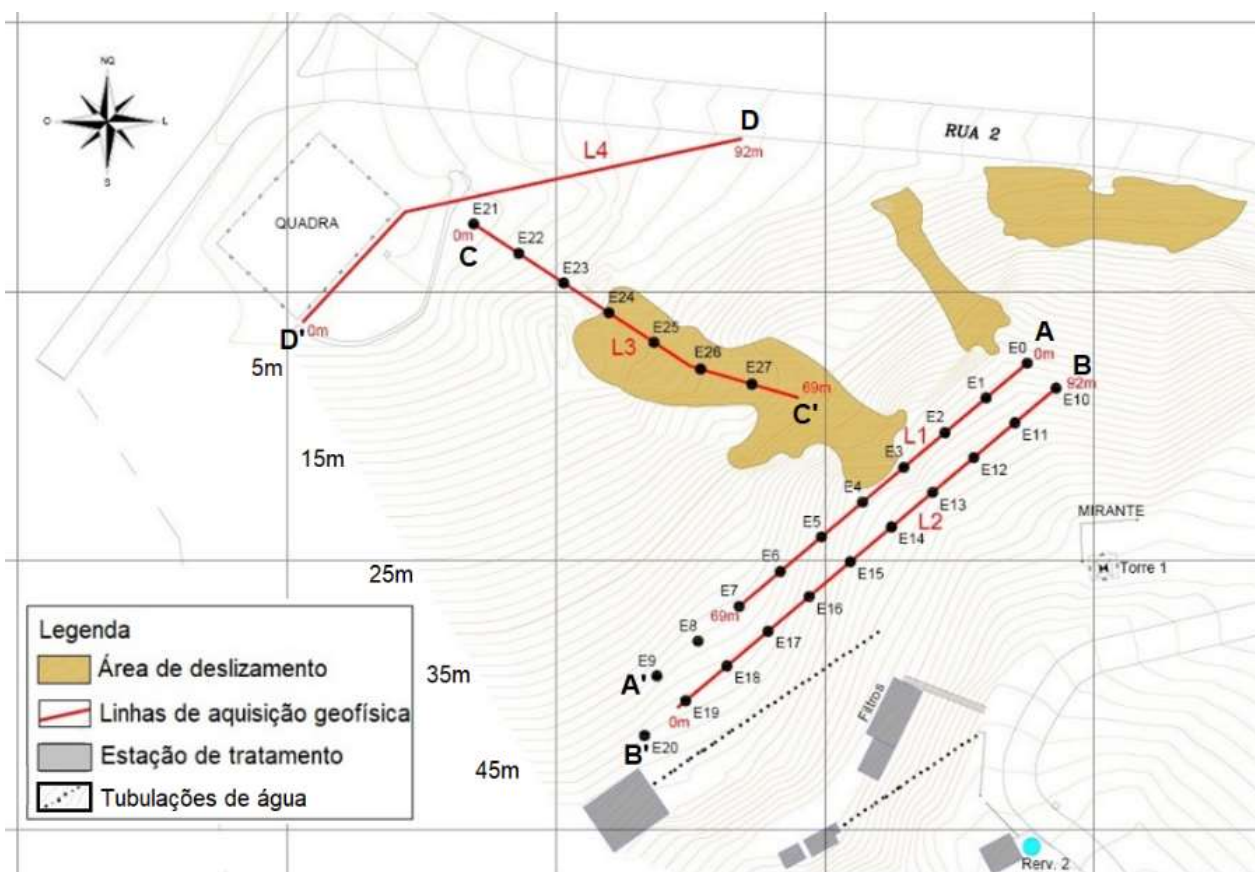


Figura 6 – Localização das linhas de interesse para a aquisição de dados de sismica de refração e tomografia de resistividade elétrica.

Fonte: Autoria própria.

Na primeira etapa, foram feitas quatro visitas técnicas com auxílio da equipe da defesa civil do município do Guarujá para o dimensionamento das áreas de deslizamentos de terra, a abertura de picadas e mapeamento geológico preliminar na área. Nesse tempo também pudemos fazer a marcação das linhas de sondagem de geofísica. A segunda etapa foi iniciada com o levantamento de sismica de refração nas quatro linhas (Figura 6) no primeiro semestre de 2021.

Em cada linha, a aquisição foi feita usando dois espaçamentos diferentes (5 e 3 metros). A tomografia obtida a partir do caminhamento elétrico com 5m de espaçamento alcançaram as maiores profundidades; em contrapartida os caminhamentos realizados com 3m de espaçamento apresentaram um maior detalhamento dos corpos em subsuperfície. Além disso, o uso de ambos os espaçamentos no caminhamento elétrico possibilitou a análise comparativa de ambas as imagens, aprimorando o nível de interpretação e evitando possíveis ambiguidades.

A primeira campanha foi realizada no final do período climático seco (setembro) para estabelecer um referencial de base no monitoramento da distribuição da umidade no tempo e no espaço. Já a segunda campanha foi executada no início do período climático chuvoso (dezembro).

Os dados geofísicos foram interpretados qualitativamente a partir da comparação dos resultados com os valores de referência estabelecidos na literatura para cada material geológico. Além disso, a interpretação se baseou na análise comparativa de ambos os métodos geofísicos, de modo a avaliar a segurança dos dados e eliminar possíveis ambiguidades. Por fim, todas as informações coletadas na pesquisa foram confrontadas às informações obtidas no mapeamento geológico e na literatura disponível.

3. Resultados e Discussões

3.1 Sísmica de Refração

A investigação com sísmica de refração foi realizada ao longo das quatro linhas pré-estabelecidas (L1, L2, L3 e L4) para o reconhecimento preliminar do perfil de intemperismo. No geral, foi possível identificar um modelo com três camadas com velocidades distintas. As velocidades sugerem uma camada de solo superficial pouco espessa e rica em matéria orgânica. Logo abaixo, temos um solo residual escavável, seguido de uma camada de solo mais consolidada. A profundidade máxima alcançada com a sísmica de refração variou entre 10 e 12m nas linhas posicionadas no topo da encosta e no material escorregado, L1, L2 e L3 respectivamente. Além disso, não foi possível identificar o topo da rocha sã nas seções de sísmica de refração (Figura 7).

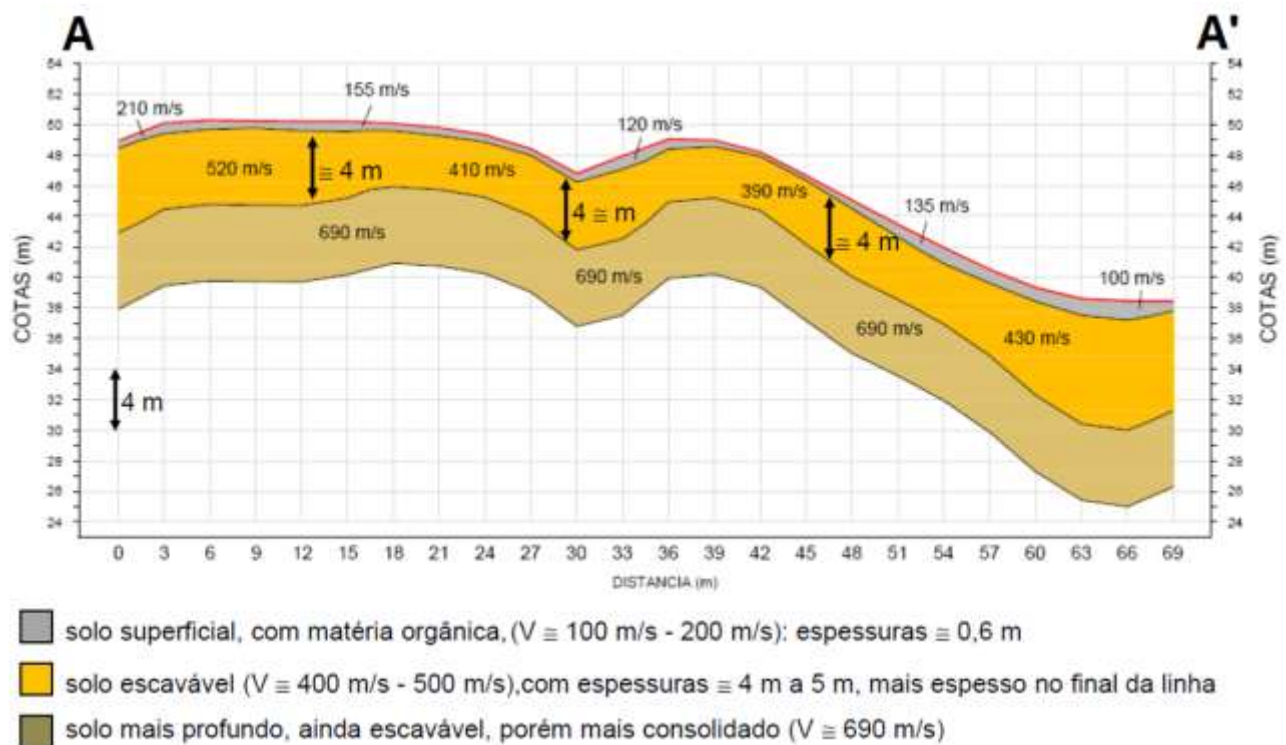


Figura 7 – Resultado da Sísmica de Refração executada sobre a Linha 1 (L1), topo da encosta.

Fonte: Autoria própria.

O levantamento sísmico de refração executado na linha 2 gerou um modelo de velocidade que segue o mesmo padrão da linha 1 com três camadas. Uma camada mais superficial de baixa velocidade, entre 150 e 250m/s (cinza), seguido de uma camada intermediária mais espessa, entre 420 e 550m/s (amarela), podendo sugerir um material areno-siltoso pouco consolidada (escavável). Por fim uma terceira camada, entre 720 e 780m/s (marron) representando um mesmo material geológico com um grau de consolidação maior, sendo impenetrável por sondagem a trado manual. A interface sísmica que limita a camada intermediária da profunda coincidiu com a profundidade máxima (~5,95m) alcançada na sondagem a trado manual, realizado nas proximidades da estaca 16 (E16). Esta profundidade máxima escavável está associado ao limite geotécnico (Figura 8).

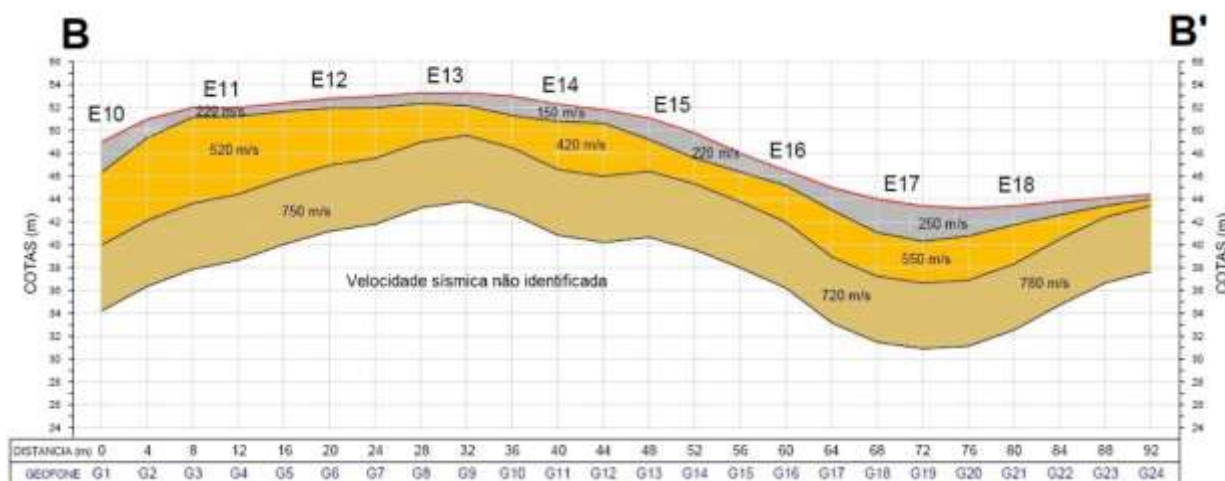


Figura 8 – modelo sísmico referente a linha 2.
Fonte: Autoria própria.

A partir das linhas investigadas (L1, L2, L3, L4) cabe destaque a linha 3 (L3) cujo modelo de velocidade apresentou valores de velocidade discrepantes.

O modelo obtido para a linha L3 contém duas camadas, sendo a primeira camada (cinza) com velocidades entre 130 – 230m/s, um padrão de velocidade que, no contexto, sugere um material geológico desagregado e altamente poroso na camada mais superficial. Na camada intermediária (amarela) temos velocidade variando lateralmente entre 400m/s e 800m/s, já terceira camada não pode ser identificada com a sísmica de refração. A considerável variação lateral condiz com a natureza relativamente porosa e permeável do material geológico comumente identificado em colúvios sobretudo nas camadas mais superficiais da linha de interesse (Figura 9).

Entende-se que processo de movimentação sofrida durante a deposição faz com que o material escorregado tenha um padrão heterogêneo na distribuição granulométrica, apresente camadas inclinadas, além da possibilidade de ter matéria orgânica soterrada. Esta distribuição não uniforme dos materiais geológicos faz com que não haja um padrão homogêneo na distribuição das velocidades sísmicas. Assim como nas linhas 1 e 2, o modelo de velocidade sísmica apresentado na linha 3 não indicam a presença da rocha sã na profundidade investigada.

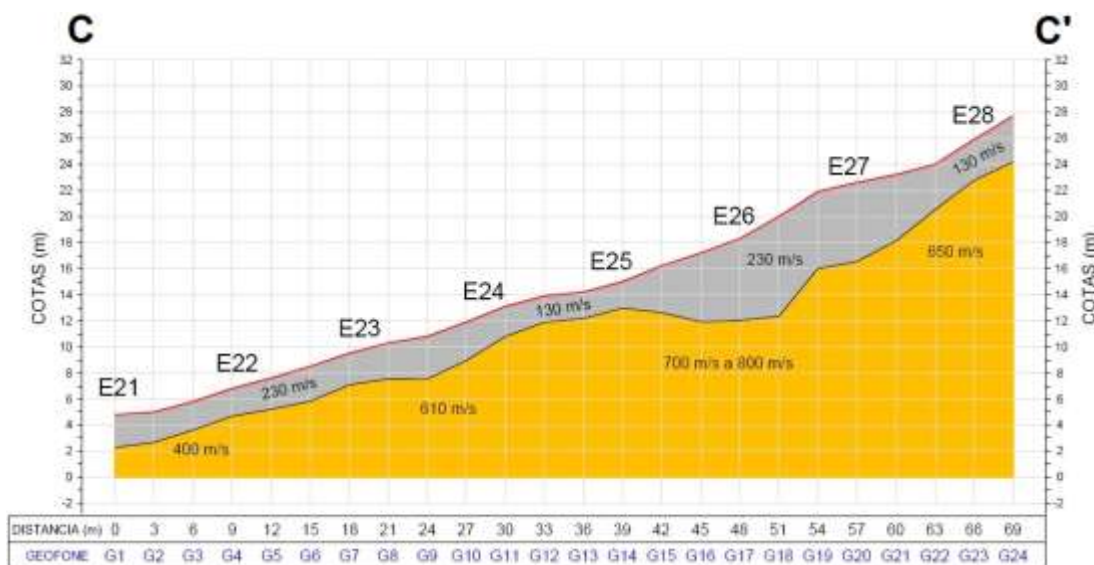


Figura 9 – Modelo sísmico inferido referente a linha 3, na encosta.
Fonte: Autoria própria.

A linha 4 está posicionada fora da encosta e adjacente à estrada do condomínio. A razão para o posicionamento desta linha está relacionada a necessidade de se ter um registro com pouca influência do escorregamento. A seção sísmica na linha 4 apresenta um modelo de três camadas de velocidades bem distintas, sendo a primeira camada com velocidades entre 160 e 430m/s, sugerindo um solo de base utilizado para construção da estrada (nos primeiros 20m da linha) e um material geológico de aterro (a partir dos 20m da linha), ambos possivelmente associados a obras de urbanização do condomínio Marinas Guarujá. Já a segunda camada sísmica apresenta velocidade de 740m/s em toda sua extensão, um extrato que indica a princípio um solo residual contínuo e homogêneo. Logo abaixo o modelo identificou velocidades maiores que 2000m/s, um contexto característico de rocha alterada. Cabe destacar que apesar de não delimitada, foi no setor mais profundo da linha 4 onde o padrão de velocidades mais se aproximou da rocha sã (Figura 10).



Figura 10 – Modelo sísmico inferido referente a linha, 4.
Fonte: Autoria própria.

3.2. Tomografia de Resistividade Elétrica

3.2.1. Topo da Encosta

O modelo geoeletrico da figura 12 apresenta o resultado do caminhamento elétrico na linha 1 seguido da linha 2, ambas localizadas no topo da encosta espaçadas de 7m de distância. A profundidade máxima alcançada nas seções foi de aproximadamente 15m. A zona mais superficial (até 0,6m) de ambas as seções (Figura 11) apresentaram pequenas divergências possivelmente associadas às variações locais na quantidade de matéria orgânica, na presença de água ou mesmo variações locais nos componentes litológicos, fato este que, em alguma medida, pode ser observado nas outras seções geoeletricas.

No âmbito geral, é possível identificar nas seções 1 e 2 dois domínios principais. O domínio da esquerda apresenta resistividades predominantemente elevadas ($>3000 \Omega.m$) em relação ao domínio da direita. No domínio a esquerda as anomalias de alta resistividade ocorrem com formato circular que pode sugerir a presença de rocha muito alterada, até então não identificados na sísmica de refração (Figura 11).

No trecho das linhas 1 e 2, entre 65 e 80m, temos uma anomalia de baixa resistividade ($<300 \Omega.m$), o que evidencia condições de saturação até uma profundidade de 7,5m em ambas as seções. Nos domínios mais profundos percebemos uma tendência de padronização, com valores de resistividade mais uniformes lateralmente, fato este mais evidente na linha 1. Na profundidade máxima investigada não foi possível identificar o nível estático (Figura 11). Aqui é possível observar o condicionamento do relevo sobre o sinal, nas áreas mais baixas temos o acúmulo de maiores pacotes sedimentares, além de solos mais espessos onde tem-se uma maior humidade. Este domínio saturado pode estar relacionado à aquíferos suspensos oriundo de camadas impermeáveis como pedaços de rochas ou devido a distribuição irregular de áreas úmidas no regolito, ou ainda áreas de concreção de argilas, o que é menos provável visto o tipo de relevo e pedologia.

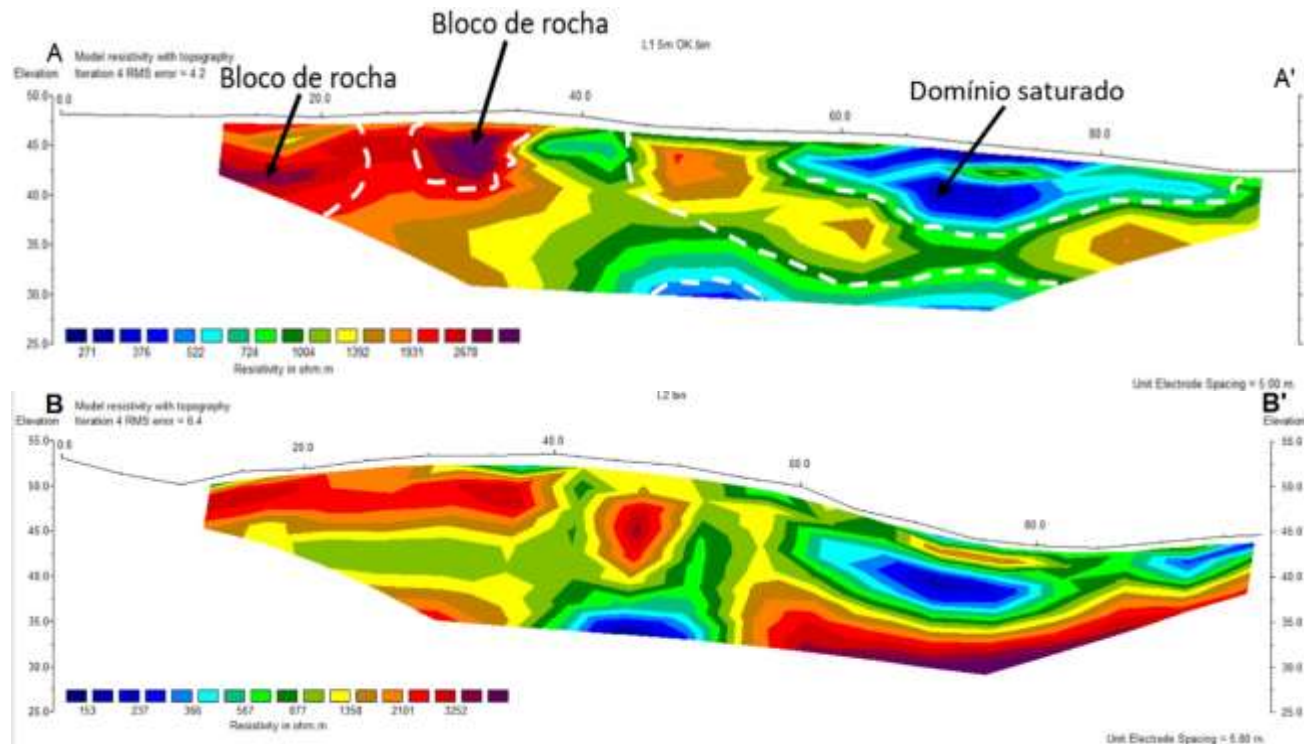


Figura 11 – Tomografia de resistividade elétrica (ERT) das linhas 1 e 2, afastadas lateralmente em aproximadamente 7m e localizadas no topo da encosta.
Fonte: Autoria própria.

Na análise conjunta dos dados de sísmica de refração e tomografia de resistividade elétrica, os dados apontam uma correspondência satisfatória entre os métodos. O limite geotécnico identificado em campo com o trado manual na estaca 15 da linha 2 coincidiu com os valores de resistividade na tomografia dessa linha. Os valores de velocidade na 3ª camada (marrom) (Figura 8) estão compatíveis com os valores de resistividade entre 12 e 15m de profundidade na linha 2, B-B' Figura (11), em quase toda a extensão.

3.2.2. Material Escorregado

A ideia de realizar o caminhamento elétrico ao longo da encosta teve como propósito detalhar os materiais geológicos nos primeiros 10m de profundidade, avaliar a distribuição da umidade em profundidade e suas variações no tempo (período seco e chuvoso), detectar domínios preferenciais de percolação da água infiltrada, além da presença da rocha sã.

Por conta de aspectos operacionais como, por exemplo, a relação entre o tamanho do arranjo frente ao reduzido tamanho da linha, optou-se por não executar o caminhamento elétrico com espaçamento de 5m. Neste sentido o caminhamento elétrico foi realizado apenas com espaçamento de 3m. Na oportunidade o modelo de resistividade conseguiu imagear a subsuperfície na profundidade máxima de aproximadamente 10m, não conseguindo identificar o nível estático.

A seção apresentou variações consideráveis nos valores de resistividade fato este associado a complexidade natural de um material escorregado. A grande variabilidade textural, a presença de fragmentos de rocha, e a movimentação do solo devido o transporte pela ação da gravidade responde pela considerável variabilidade nos dados.

A seção possui uma anomalia verticalizada de baixa resistividade no centro da seção. Um domínio que se repete no contexto climatológico chuvoso. A existência de uma drenagem cruzando a seção na direção perpendicular à linha pode estar associada a esta anomalia.

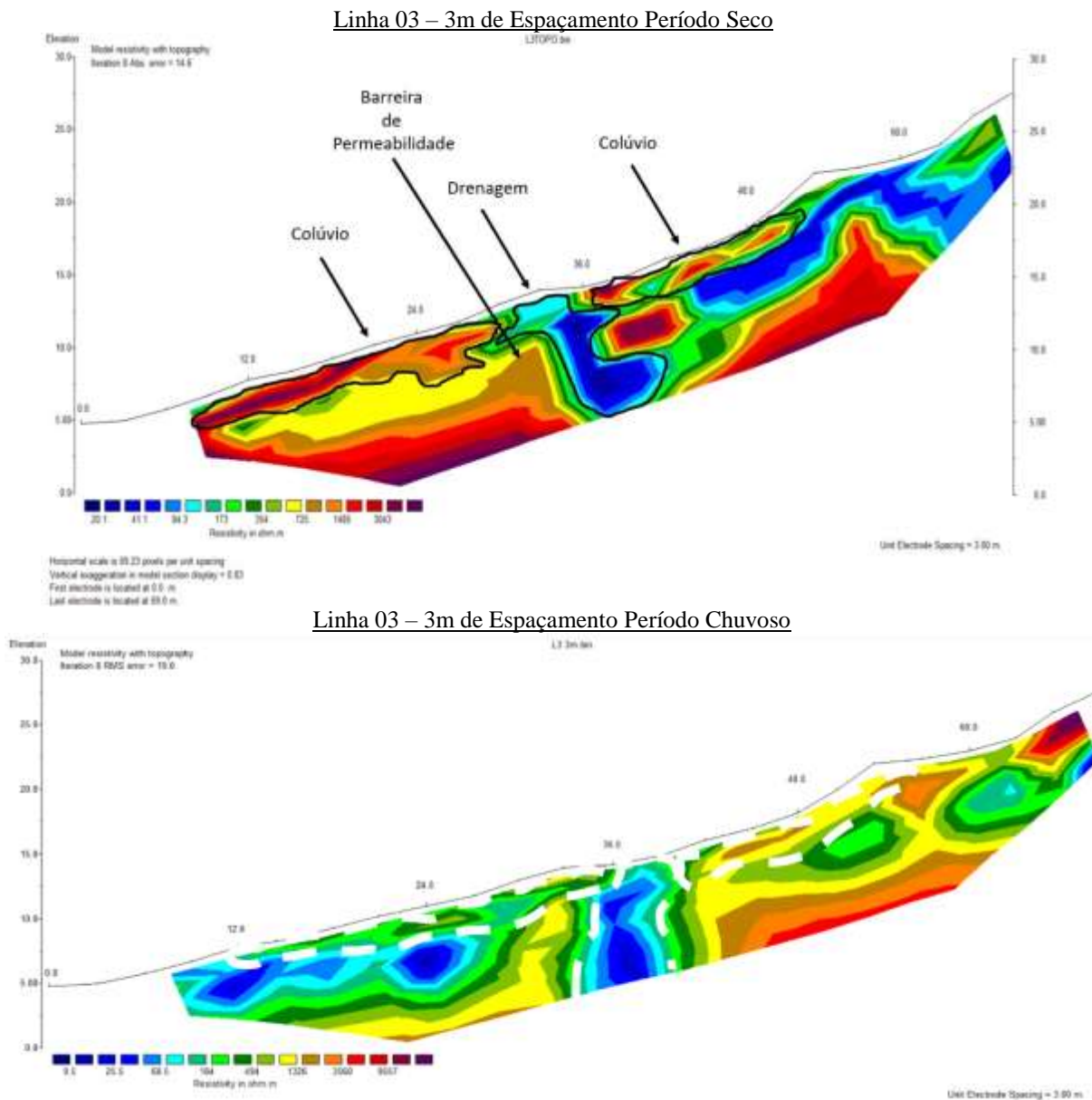


Figura 12 – Tomografia de resistividade elétrica (ERT) L3, localizada na encosta em períodos climáticos distintos (seco e chuvoso).

Fonte: Autoria própria.

A análise da ERT nos períodos seco e chuvoso, juntamente com a refração, percebemos que independente da mudança pluviométrica ocorrida entre as leituras, existem dois domínios diferentes delimitados por uma anomalia verticalizada ??? o que gera isso de baixa resistividade. O primeiro domínio que vai do início da linha até o marco 36m, seguido de um segundo domínio encosta acima a partir de 36m. No segundo domínio o material escorregado apresenta considerável heterogeneidade nos valores de resistividade, além de apresentar consideráveis variações na resistividade do período seco para o chuvoso, um quadro que sugere um material altamente poroso e permeável. Em contrapartida, no primeiro domínio temos um padrão de resistividade mais homogêneo que apresenta pouca variação nos valores de resistividade entre os períodos seco e chuvoso, sugerindo uma menor permeabilidade e maior consolidação em relação ao segundo domínio.

3.2.3. Sopé da Encosta

O caminhamento elétrico correspondente a linha 4 foi executado na base da encosta e adjacente a estrada do condomínio. Assim como na sísmica de refração, os resultados apresentaram um padrão de resistividade com camadas apresentando continuidade lateral, em contraposição às outras seções. Tal realidade sugere que a linha 4 foi pouco afetada pelo escorregamento recente ocorrido no Morro do Mirante.

O modelo de resistividade foi obtido a partir do caminhamento elétrico realizado com o espaçamento de 5 e 3m de espaçamento. Em ambas a seção L4 identificou nos primeiros 5 metros de profundidade um padrão de resistividade acima de $700\Omega.m$, sobretudo nos primeiros 50m da linha. Feição bem destacada na seção podendo sugerir um solo modificado para a construção da estrada (Figura 13).

Na transição para o período climático chuvoso, percebemos uma leve redução nos padrões de resistividade, indicando a influência da umidade na distribuição da resistividade em subsuperfície, embora o padrão de resistividade persista. A partir de 5m de profundidade, os valores de resistividade reduzem consideravelmente (<200), em sua maior parte apresentando valores de resistividade inferiores a $100\Omega.m$, tanto no final do período climático seco quanto na transição para o período chuvoso. A mudança nos valores de resistividade em relação às camadas mais superficiais sofre influência tanto da água subterrânea proveniente da encosta, nos primeiros 40m da linha, quanto da cunha salina, nos últimos 60m.

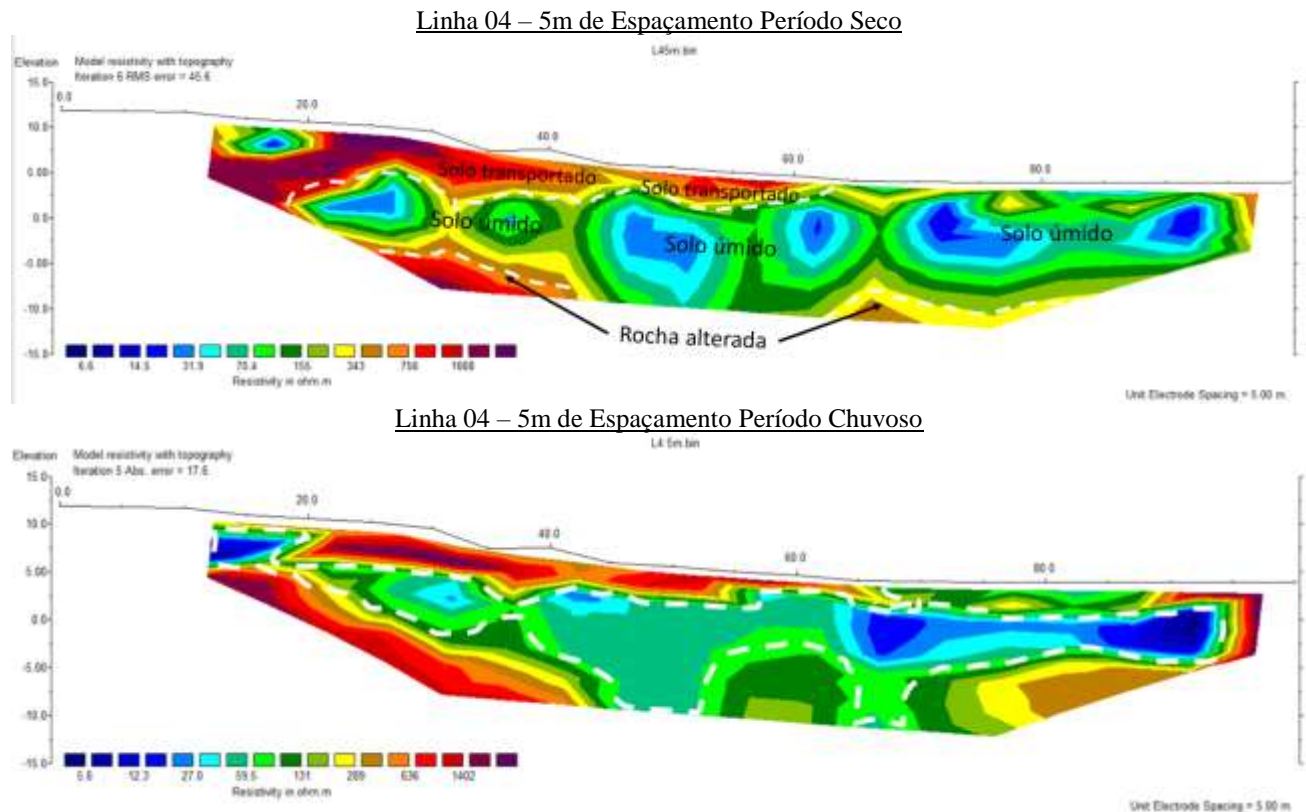
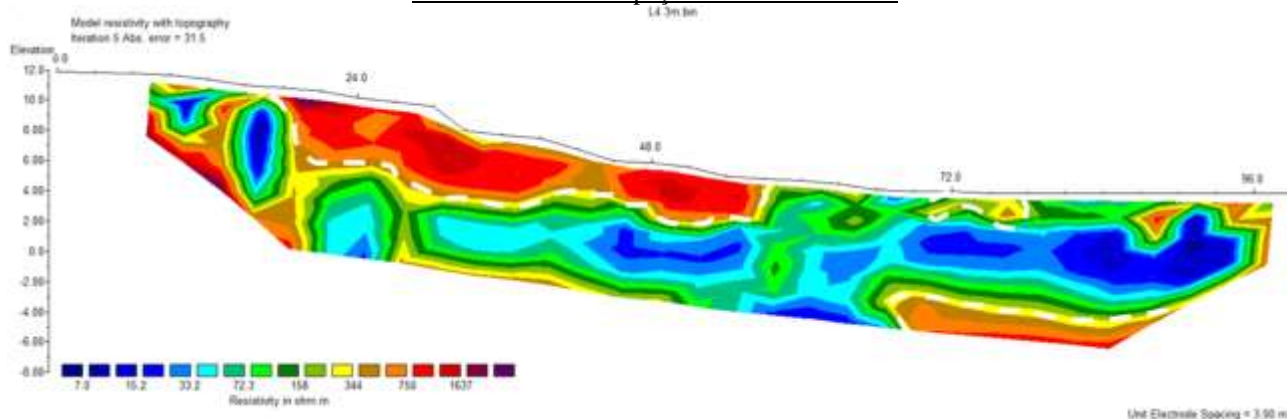


Figura 13 – Seção geolétrica L4 com 5m de espaçamento, localizada na encosta em períodos climáticos distintos (seco e chuvoso).

Fonte: Autoria própria.

Linha 04 – 3m de Espaçamento Período Seco



Linha 04 – 3m de Espaçamento Período Chuvoso

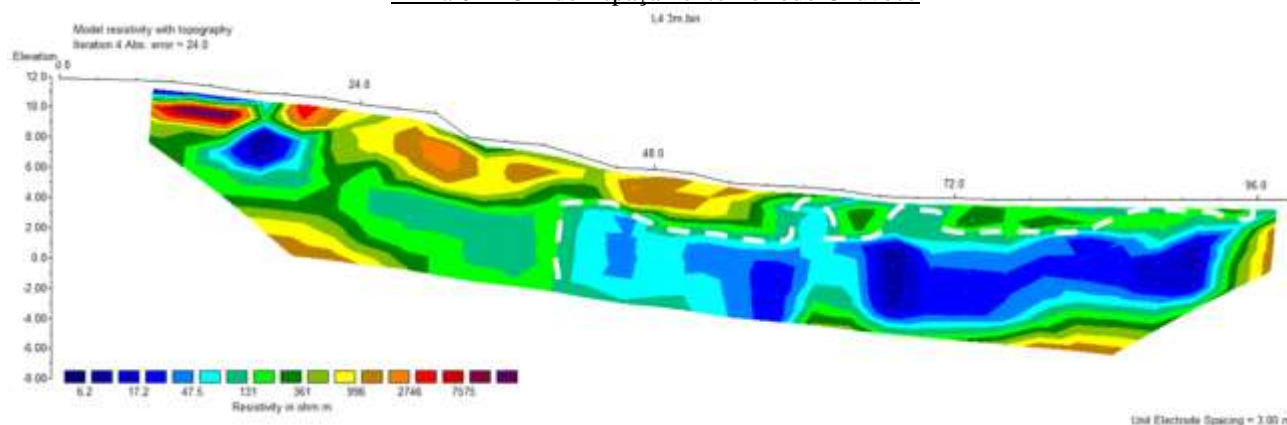


Figura 14 – Tomografia de resistividade elétrica (ERT) L4 com 3m de espaçamento, na base da encosta em períodos climáticos distintos (seco e chuvoso).

Fonte: Autoria própria.

Analisando a linha 4 (Figura 10, 13 e 14) a partir de ambas as metodologias (refração e ERT) podemos identificar uma geologia menos afetada pelo escorregamento em relação ao observado nas outras linhas. A continuidade lateral dos estratos sísmicos e geoeletricos possuem correspondência satisfatória, ou seja, sugerem o mesmo quadro geológico, uma camada superficial na forma de um solo transportado, seguido de um solo mais coeso em contato com a rocha alterada. O predomínio de feições com resistividade elétrica condiz com a posição da linha 4 a vista tratar-se de uma área de descarga de água subterrânea. Nos modelos de umidade foi possível também inferir o nível estático na base da encosta.

Podemos perceber, pela análise das figuras acima as contribuições resultantes da integração das técnicas supracitadas (IMANI *et al.*, 2021). Por exemplo, enquanto a sísmica de refração alcançou profundidades maiores, a tomografia de resistividade elétrica apresentou uma melhor resolução sobretudo para delimitar corpos hídricos, devido a sensibilidade a presença de água. Além disso a refração não admite inversão de velocidade das camadas em profundidade, limitação suprida pela ERT.

Os resultados possibilitaram identificar e caracterizar com maior precisão os diferentes níveis do regolito da Encosta do Mirante e a distribuição da umidade em diferentes contextos hidrológicos. A possibilidade de imagear o solo lateralmente por meio do caminhamento elétrico oferece uma visão mais ampla e contínua da encosta, comparativamente aos métodos convencionais. Identificando variações de resistividade e sua relação com aspectos litológicos e hidrológicos. Limitações de natureza operacional, como dificuldade de acesso por conta da vegetação densa e a declividade acentuada da encosta, por vezes inviabilizou um mapeamento geofísico mais amplo.

O arcabouço metodológico utilizado apresentou significativa eficiência na análise geotécnica em regolito de encosta. A proposta de utilizar modernas técnicas computacionais para o processamento dos dados, a estratégia de aquisição

simultânea de um grande volume de dados, possibilitou o aprimoramento na caracterização e reconhecimento de materiais geológicos em profundidade. Além disso, a associação de determinados metodologias de geofísica com abordagens de caracterização via métodos diretos consiste em uma promissora ferramenta para complementar o estudo geotécnico convencional em áreas encostas.

Considerando aspectos geológicos, geomorfológicos, geotécnicos e geofísicos desenvolvidos até aqui, acredita-se que a área necessita de mais estudos conclusivos acerca do grau de estabilidade do terreno, e consequentemente do risco de movimentos de massa futuros. Embora não seja uma área de alta densidade populacional, cabe salientar a extrema fragilidade ambiental da área de estudo, pois a natureza silto-argilosa, extremamente úmida, dos solos presentes (fato observado no período seco e no chuvoso) favorece uma perda de coesão que, aliado às condições geomorfológicas desfavoráveis representa um perigo a população, sobretudo quando exposto a intensos episódios de chuvas.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram que a estratégia metodológica utilizada consiste em uma poderosa ferramenta de avaliação para áreas de encosta, oferecendo uma visão acurada do regolito na área afetada pelo deslizamento de terra e assim fornecendo uma base para inspeções geotécnicas mais seguras e eficazes. No entanto, tal fato não descarta a necessidade de análise por meio de métodos diretos, como medidas *in situ* e análise laboratorial de amostras de solo.

A associação dos métodos sísmico e elétrico atestou o caráter complementar de ambas, considerando a problemática dos escorregamentos, possibilitando realizar um diagnóstico geotécnico mais amplo e seguro, relativamente aos métodos convencionais. A correspondência entre os resultados (ERT e SR) evidencia a boa qualidade dos dados adquiridos. A investigação realizada no material escorregado identificou consideráveis variações nas propriedades físicas, tanto no modelo sísmico quanto no modelo geoeletrico, fato que atesta o potencial da estratégia metodológica na caracterização dos materiais geológicos em encostas associadas a escorregamentos. No entanto tal fato não descarta a necessidade de análises adicionais por meio de métodos diretos.

No geral, o solo apresenta um padrão com baixos valores de resistividades, sugerindo uma área úmida, mesmo em períodos secos. Fato este associado ao contexto climático da região com alto índice pluviométrico, além das características do solo presente. Em geral, o solo silto-argiloso possui uma histerese hidráulica alta. Essa característica faz com que durante a chuva a água consiga infiltrar com relativa facilidade na superfície, ao mesmo tempo em que, no período seco, parte dessa água acaba por ficar retida nos poros mais estreitos, ocasionando um escoamento da água mais lento.

O monitoramento por tomografia, realizado a partir de dois períodos climáticos distintos (seco e chuvoso), permitiu distinguir qualitativamente alterações significativas nos valores de resistividade. Com o uso desta técnica, foi possível inferir variações de umidade e condutividade hidráulica, delimitar blocos de rocha, além de identificar o alcance da movimentação em profundidade.

A área de estudo possui um solo residual jovem, de natureza silto-argilosa, com destacada presença de fragmentos de rocha gnáissica extremamente alterada. No topo da encosta a profundidade mínima da rocha não pode ser identificada em alguns pontos a aproximadamente 8m, sendo que, nas camadas mais superficiais apresenta um comportamento mais siltoso e menos compactado. Nas profundidades maiores este solo tende a ser mais argiloso e compactado. Nesse compartimento o solo apresentou padrões indicativos de movimentação de forma diferenciada na direção transversal sugerindo variações declividade locais nos pontos de mesma cota. Cabe destacar também que nesse compartimento da encosta, especificamente no final das linhas 1 e 2, as anomalias de baixa resistividade permanece com o mesmo padrão, tanto no período seco quanto no período chuvoso, o que sugere um processo contínuo de infiltração de água na encosta. Um contexto que possivelmente esteja associado à presença da estação de tratamento de água que fica adjacente as linhas 1 e 2.

Ao longo do material escorregado, a presença do topo rochoso ocorre em alguns pontos, entre 6 e 7,5m de profundidade, sendo marcante as consideráveis variações laterais nos dados geofísicos, claramente associada a uma movimentação diferenciada em vários níveis de profundidade. A análise integrada da ERT entre os períodos seco e chuvoso no material escorregado revelou um contexto hidrológico composto por uma anomalia verticalizada de baixa resistividade separando dois domínios do material escorregado no marco 36m da linha 3. Enquanto na primeira metade da linha temos um padrão de resistividade mais homogêneo, na segunda metade temos um padrão mais heterogêneo. Cabe destacar que na análise comparativa (período seco e chuvoso) dois materiais geológicos com graus de consolidação e permeabilidade diferentes. Um contexto que sugere a presença de dois materiais correspondentes a deslizamentos ocorridos em épocas diferentes, sendo o material acima relacionado ao escorregamento de 2020, enquanto o material geológico localizado abaixo da barreira de permeabilidade corresponde a um outro deslizamento pretérito.

Devido a fragilidade ambiental apresentada na área de estudo, faz-se oportuno estudos de intervenções geotécnicas nos domínios da área estudada de modo que possam que seja viável a construção de novos estabelecimentos residenciais.

A investigação de detalhe de aspectos hidrológicos em encostas associadas a escorregamentos consiste em um tema emergente que vem trazendo contribuições relevantes para o aperfeiçoamento das investigações geotécnicas convencionais, sendo, portanto, oportuno o investimento na continuidade de pesquisas desta natureza. Pesquisas que se destinam a melhor compreender este fenômeno tão complexo e desafiador.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Estadual de Campinas – Unicamp pelo amparo institucional, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021 – universal faixa a - 405565/2021-6 – liderado pela pesquisadora Ana Elisa Silva de Abreu, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro. Agradecemos também a cooperação do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT e a Universidade de São Paulo - USP pela infraestrutura necessária ao desenvolvimento dos trabalhos de geofísica.

Referências

- BÁRTA, J., DOSTÁL, D.; BENEŠ, V.; TESAR, M. Application of Geophysical Methods in The Study of Landslide Movements, Taking Into Account Geological Conditions in The Study Mountains, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2, 121-129. 2005.
- BBC, British Broadcasting Corporation. 2023. *Dozens die as deadly storm hit Brazilian coast*, Online. Disponível em: <https://www.bbc.com/pidgin/articles/cpwj29d231po>, Data de acesso: 21/02/2023.
- BOGOSLOVSKY, V. A.; OGILVY, A. A. Geophysical methods for the investigation of landslides. *Geophysics*, vol. 42, no. 3, pp. 562–571, 1977.
- BRAGA, A. C. O. *Geofísica Aplicada: métodos geoelétrico em hidrologia*. 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*, Tese (livre docência), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, Brasil, 2006.
- BURGER, H. R.; SHEEHAN, A. F.; JONES, C. H. *Introduction to Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface*. [s.l.] W.W. Norton, 2006.
- CARDARELLI, E. Ray tracing in elliptical anisotropic media using the linear travelttime interpolation (LTI) method applied to travelttime seismic tomography. *Geophysical Prospecting*, v. 50, n. 1, p. 55-72, 2002.
- CASTRO, J. M. G. *Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto*. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 138 p, 2006.
- CHAMBERS, J. E.; GUNN, D. A.; WILKINSON, P. B.; et al. 4D electrical resistivity tomography monitoring of soil moisture dynamics in an operational railway embankment. *Near Surface Geophysics*, v. 12, n. 1, p. 61–72, 2014.
- CORSI, A. C.; MACEDO, E. S. de. *Plano Municipal de Redução de Risco do Município de Guarujá*. 16o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Anais. 2016.
- CRAWFORD, M. M.; BRYSON, L. S. *Assessment of active landslides using field electrical measurements*. *Engineering Geology*, v. 233, n. June 2017, p. 146–159, 2018b.
- DE BARI, C.; LAPENNA, V.; PERRONE, A.; et al. Digital photogrammetric analysis and electrical resistivity tomography for investigating the Picerno landslide (Basilicata region, southern Italy). *Geomorphology*, v. 133, n. 1–2, p. 34–46, 2011.

- GANDOLFO, O. C. B. *Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa*. 2007. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Acesso em: 2022-12-19.
- GÖKTÜRKLER, G.; BALKAYA, Ç.; ERHAN, Z. Geophysical Investigation of A Landslide: The Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, v. 65, n. 2, p. 84–96, 2008.
- HACK, R. Geophysics for slope stability. *Surveys in Geophysics*, v. 21, n. 4, p. 423–448, 2000.
- HGI, HydroGeophysics - Geophysical Consulting. Seismic Aq Example Graphic. hgiworld.com, 2023. Disponível em: <<https://www.hgiworld.com/methods/seismics/seismic-multi-channel-analysis-of-surface-waves-masw/seismic-aq-example-graphic-hydrogeophysics/>>. Acesso em: 08/03/2023.
- IMANI, P.; EL-RAOUF, A. A.; TIAN, G. Landslide investigation using Seismic Refraction Tomography method: a review. *Annals of Geophysics*, v. 64, n. 6, p. 27, 26 jan. 2021.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Estudos Técnicos para a criação de Unidade de Conservação (UC) na Serra de Santo Amaro, Guarujá-SP*. São Paulo. Relatório Técnico-Parcial n° 159 752-205. 2020.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. *Relatório Técnico no 93: Plano Municipal de Redução de Risco do Município do Guarujá*. São Paulo: IPT, 2007.
- ISMAIL, N. EL H.; TAIB, S.; ABAS, F. Slope monitoring: an application of time-lapse electrical resistivity imaging method in Bukit Antarabangsa, Kuala Lumpur. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, 2019.
- JABOYEDOFF, M.; OPIKOFER, T.; ABELLAN, A.; et al. Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards*, v. 61, n. 1, p. 5–28, 2012.
- JONGMANS, D.; GARAMBOIS, S. Geophysical investigation of landslides: A review. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, v. 178, n. 2, p. 101–112, 2007.
- KEAREY, P.; BROOKS, M., HILL, I., *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell, London. p. 262, 2002.
- KIRSCH, R.; YARAMANCI, U. *Geophysical characterisation of aquifers*, Groundwater Geophysics, Springer, Germany, 2006.
- LÄMMLE, L.; PEREZ FILHO, A.; DONADIO, C.; ARIENZO, M.; FERRARA, L.; SANTOS, C. J.; SOUZA, A. O. Anthropogenic Pressure on Hydrographic Basin and Coastal Erosion in the Delta of Paraíba do Sul River, Southeast Brazil. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 10, p. 1585, 2022b.
- LÄMMLE, L.; PEREZ FILHO, A.; DONADIO, C.; MOREIRA, V. B.; SANTOS, C. J.; SOUZA, A. O. Baixos terraços marinhos associados às transgressões e regressões marinhas holocênicas na Planície Costeira do rio Paraíba do Sul, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, p. 1285-1303, 2022a.
- LEHMANN, P.; GAMBAZZI, F.; SUSKI, B.; et al. Evolution of soil wetting patterns preceding a hydrologically induced landslide inferred from electrical resistivity survey and point measurements of volumetric water content and pore water pressure. *Water Resources Research*, v. 49, n. 12, p. 7992–8004, 2013.
- MCCANN, D. M.; FORSTER, A. *Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations*. Engineering Geology, v. 29, n. 1, p. 59–78, 1990.
- MCKEAN, J.; BUECHEL, S.; GAYDOS, L. *Remote-Sensing and Landslide Hazard Assessment*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 57, n. 9, p. 1185–1193, 1991.
- METTERNICHT, G.; HURNI, L.; GOGU, R. *Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments*. Remote Sensing of Environment, v. 98, n. 2–3, p. 284–303, 2005.

-
- PALMER, D. F.; WEISGARBER, S. L. *Geophysical Survey of the Stumpy Basin Landslide*, Ohio, Environment Engineering Geoscience, xxv, p. 363-370, 1988.
- PAULO, M. S. M. F.; ADAN, R. P. *Movimentações de massa ocorridas em Guarujá/SP no mês de março de 2020*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Engenharia Ambiental) Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, 2021. Santos, p. 63, 2021.
- PETLEY, D. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, v. 40, n. 10, p. 927–930, 2012.
- PICANÇO, J. L.; MESQUITA, M. J.; MELO, L. L. Geotechnical and Mineralogical Properties of Granite Regolith Related to Nucleation Mechanisms of Debris Flows in Tropical Areas. *International Journal of Erosion Control Engineering*, v. 11, p. 54-62, 2019.
- ROSIN, P. L.; HERVÁS, J. Remote sensing image thresholding methods for determining landslide activity. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 6, p. 1075–1092, 2005.
- SANTOS, C. J.; LÄMMLE, L.; MOREIRA, V. B.; PICANÇO, J. L.; MINCATO, R. L.; AYER, J. E. B. Avaliação da qualidade da água em aquífero raso em Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, p. 3241-3254, 2021.
- SOLANKI, A.; GUPTA, V.; BHAKUNI, S.S.; et al. Geological and geotechnical characterisation of the Khotila landslide in the Dharchula region, NE Kumaun Himalaya. *Journal of Earth System Science*, v. 128, n. 4, p. 86, 22 jun. 2019.
- TUPINAMBÁ, M.; TEIXEIRA, W.; HEILBRON, M. *Evolução tectônica e magmática da Faixa Ribeira entre o Neoproterozoico e o Paleozoico Inferior na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil*. Anuário do Instituto de geociências–UFRJ, v. 35, n. 2, p. 140-150, 2012.
- WARD, S. *Resistivity and Induced Polarization Methods*, Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 1, SEG, 147-189, 1990.
- WARD, W. O. C.; WILKINSON, P.; CHAMBERS, J.; et al. Distribution based fuzzy clustering of electrical resistivity tomography images for interface detection. *Geophysical Journal International*. v. 197, p. 310–321, 2014.
- WHITELEY, J. S. et al. Geophysical Monitoring of Moisture-Induced Landslides: A Review. *Reviews of Geophysics*, v. 57, n. 1, p. 106–145, 2019.