



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 8, n° 2 (2022)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2ID29804>



Estudo da estabilidade de taludes em Petrópolis (RJ) através dos métodos geofísicos GPR e ERT

Study of slope stability in Petrópolis (RJ) through the geophysical methods GPR and ERT

Gleide Alencar do Nascimento¹; Adrianna Jakeline Silva²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Geologia. Rio de Janeiro, Brasil. Email: gleide@geologia.ufrj.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1315-4805>

² Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Geologia. Rio de Janeiro, Brasil. Email: adrianna.jakeline@live.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3691-7104>

Resumo: O deslizamento de taludes é um fenômeno natural que ocorre em todo mundo e que pode ocasionar perda de vidas humanas e materiais. Sendo a possibilidade de se avaliar essas áreas de risco através dos métodos geofísicos. Nesse estudo foram utilizados os métodos Radar de Penetração do Solo (GPR) e Tomografia Elétrica de Resistividade (ERT) na Rua Mato Grosso, no bairro de Quitandinha, Petrópolis (RJ), a qual é suscetível a deslizamentos de taludes. O GPR é fundamentado na propagação das ondas eletromagnéticas com frequências entre 10 e 6000 MHz, sendo na aquisição dos dados utilizado uma antena de 200 MHz e o processamento de dados realizados no programa REFLEXW. O ERT é baseada na diferença de potencial elétrico dos campos elétricos naturais ou artificiais, foram utilizados para aquisição de dados 24 eletrodos, com processamento de dados no programa RES2DINV e uma simulação de dados no programa RES2DMOD. Nos resultados obtidos foram constatados, diferença de solo consolidado e inconsolidado em aproximadamente 1,5 m de profundidade que pode gerar futuros deslocamentos de terra, assim como a presença de blocos de diversos tamanhos espalhados pela área, sendo indícios de que a área já sofreu com deslizamentos de terras, além de pontos de drenagem e acúmulo de água elevando os riscos de deslizamento. O uso de métodos geofísicos vem a contribuir na análise da instabilidade de taludes e ajudar a evitar futuros desastres.

Palavras-chave: Deslizamento; GPR; ERT.

Abstract: Slope sliding is a natural phenomenon that occurs all over the world and that can cause loss of human lives and material. Being the possibility of evaluating these risk areas through geophysical methods. In this study, the Ground Penetration Radar (GPR) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) methods were used at .Mato Grosso Street, in the Quitandinha neighborhood, Petrópolis (RJ), which is susceptible to landslides. The GPR is based on the propagation of electromagnetic waves with frequencies between 10 and 6000 MHz, using a 200 MHz antenna for data acquisition and data processing performed in the REFLEXW program. The ERT is based on the electric potential difference of natural or artificial electric fields, 24 electrodes were used for data acquisition, with data processing in the RES2DINV program and a data simulation in the RES2DMOD program. In the results obtained, a difference between consolidated and unconsolidated soil at approximately 1.5 m depth that can generate future mass movement, as well as the presence of blocks of different sizes scattered throughout the area, were observed, being indications that the area has already suffered with landslides, as well as drainage points and water accumulation, increasing the risks of landslides. The use of geophysical methods contributes to the analysis of slope instability and helps to avoid future disasters.

Keywords: Landslides; GPR; ERT.

Recebido:08/03/2022; Aceito:23/09/2022; Publicado:15/12/2022.

1. Introdução

O bairro Quitandinha, localizado em Petrópolis, município da região serrana do Estado do Rio de Janeiro, teve sua origem em 1843, inicialmente como uma cidade planejada e projetada através do Plano Köeler, mas o planejamento de Petrópolis foi abandonado e ao longo dos anos teve o seu crescimento desordenado. A cidade vem sendo afetada por inúmeros movimentos de massa (e.g. 2011), que atingiu grande parte da região serrana, causando um total de 947 óbitos, sendo 71 em Petrópolis (GUERRA; JORGE, 2014). Já em 2022, o número de mortes causadas por esse evento foi de 238, somente em Petrópolis (AGENCIABRASIL, 2022).

O movimento de massa segundo Silva (2006), é caracterizado pelo deslocamento de parte do solo, rocha ou podendo ocorrer à combinação de ambos em um plano inclinado, no qual sofre ação de forças internas e externas, denominado de encosta. Já para Varnes (1984), o movimento de massa é caracterizado por processos geológicos exógenos que englobem o deslocamento de matéria, como rocha, solo e detritos, que pode ocorrer de forma natural ou artificial. Com base em Highland & Bobrowsky (2008), o processo de deslizamento ocorre quando há um movimento de rocha, solo ou ambos, em declive, que acarreta na ruptura de uma superfície, ocasionando um escorregamento rotacional quando ocorre uma ruptura curva ou escorregamento translacional no caso de uma ruptura planar, podendo ocorrer ambos os casos ou até mesmo outros tipos durante o deslocamento do material em movimento. Já o talude é a denominação que se dá para superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser natural, chamado de encosta, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e cortes (GERSCOVICH, 2016).

A utilização de métodos geofísicos vem sendo amplamente empregados em estudos como: ambiental, mineração, hidrogeologia, dentre outros, devido a sua praticidade, por serem métodos não invasivos que permitem a visualização do solo de forma mais rápida em comparação com outros métodos convencionais, como os ensaios diretos, otimização do tempo na aquisição e execução dos dados. Sendo os métodos os métodos Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) e Tomografia Elétrica de Resistividade ou Eletroresistividade (*Electrical Resistivity Tomography* - ERT) cada vez mais empregado nesses tipos de estudos. Este trabalho tem como objetivo a verificação da estabilidade de taludes da Rua Mato Grosso, no município de Petrópolis, através da utilização dos métodos geofísicos de ERT e GPR. Segundo Marques (2016) essa rua está dentro das áreas de riscos de locais suscetíveis a deslizamentos.

2. Materiais e métodos

Inicialmente foi realizado o estudo bibliográfico sobre os tipos e comportamento dos movimentos de massa existentes, assim como os que mais ocorrem na área de estudo. Foi preciso compreender e estudar os métodos geofísicos, principalmente GPR e ERT, desde a sua fundamentação teórica até sua aquisição e processamento de dados, para analisar sua aplicabilidade, vantagens e desvantagens para o estudo da verificação da estabilidade de taludes. Com base nas seções de radargrama da aquisição de GPR que já se tinha da área de estudo realizada por Marques (2016), e o conhecimento bibliográfico da região, criou-se uma pseudo-seção teórica de resistividade aparente bidimensional (2D) no programa gratuito RES2DMOD, para ser obter uma comparação com a seção obtida através da aquisição de dados de campo com o equipamento de eletroresistividade. A intercessão do processamento de dados das linhas 1 e 2 do GPR corresponderam aproximadamente ao dado obtido com o método de ERT.

Para esse tipo de estudo o GPR pode ser utilizado em imageamento de solo raso, estruturas de rocha, identificação de canais enterrados e mapeamento do lençol freático, já o ERT pode obter informações como nível d'água no solo, espessura da camada de solo, geometria e localização do embasamento, presença ou ausência de fraturas, tamanho dos fragmentos rochosos e identificar planos preferenciais de escorregamento, determinação de plumas de contaminação e tanto no solo como em aquíferos.

2.1 Método do GPR

O GPR gera onda eletromagnética de alta frequência (10 - 6000 MHz) que se propaga no solo de acordo com as características elétricas dos materiais. Após entrar em contato com o material, parte do sinal transmitido é refletido para um receptor em superfície, que posteriormente processado gerando a seção radargrama (figura 1). Como as rochas sedimentares, metamórficas e ígneas são consideradas semicondutoras ou dielétricas, podendo ser definidos por três propriedades: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética. As propriedades do GPR são baseadas nas equações de Maxwell, através da teoria de propagação de ondas eletromagnéticas. Ao ser perturbado as partículas eletromagnéticas carregadas, se propagam no meio, gerando as ondas eletromagnéticas. Durante o mapeamento

da Rua Mato Grosso em Quitandinha, Marques (2016) utilizou o equipamento Terra SEARCH SIR (*Subsurface Interface Radar*) System-3000, produzido pela *Geophysical Survey Systems Incorporated, Inc* (GSSI), e antena blindada monoestática de 200 MHz (figura 1).

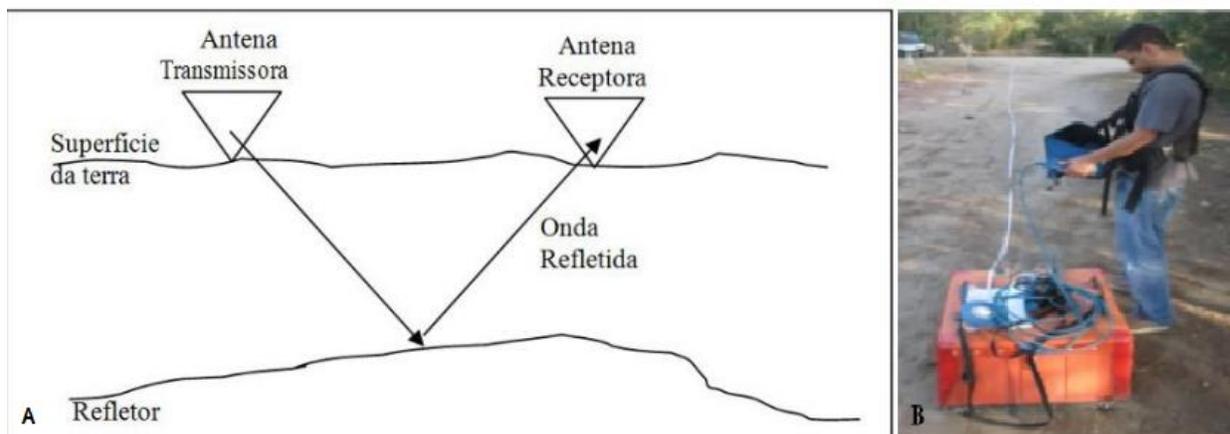


Figura 1 - Esquema com arranjo das antenas e propagação de ondas no GPR (à esquerda) e equipamento TerraSEARCH SIR (à direita).
Fonte: Braga (2006).

Através da aquisição de dados *common off-set* com um afastamento constante de 30 cm, foram obtidos doze perfis em linha reta ao longo da rua, (figura 2). Segundo Marques (2016), para o processamento de dados do GPR foi utilizado o programa REFLEX – Interpex, através das etapas: ajuste tempo-zero (*timezero*), *dewow*, *remove background*, filtro passa-banda (*band-pass filter*), ganho (*AGC Gain*), migração 2d (*2dmigration*).



Figura 2 - linhas de aquisição de GPR da Rua Mato Grosso.
Fonte: Marques (2016).

Na área da linha 1, o solo é extremamente intemperizado, arenoso-argiloso, com a presença de poucos fragmentos de rochas com variação de cm a metros (figura 3), à medida que progride em direção a área da linha 2 passa a ter uma coloração mais avermelhada (figura 3). Na figura 4 se tem a seção radargrama não processada e processada.



Figura 3 - (A) Local da aquisição de dados da linha 1. (B) coloração do solo avermelhado do solo.
Fonte: Marques (2016).

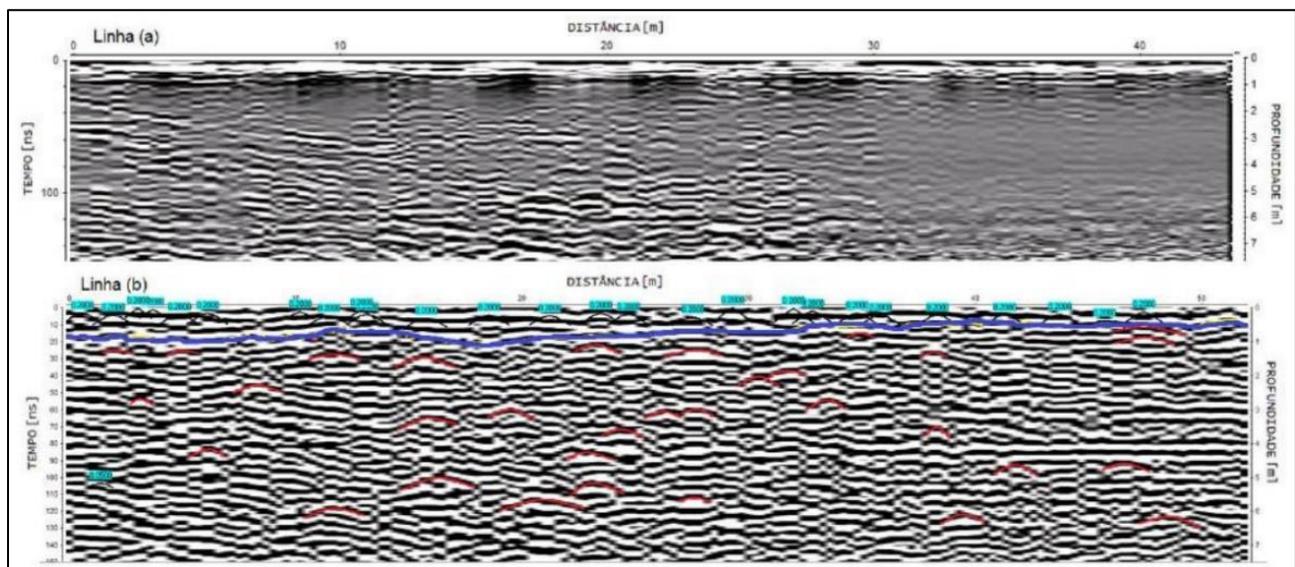


Figura 4 - (A) Linha de aquisição 1 da Rua Mato Grosso não processada. (B) Linha processada.
Fonte: Marques (2016).

Na área da linha 2, o solo é arenoso-argiloso, com a coloração avermelhada e (figura 5). Na seção de radargrama foi constatado fragmentos rochosos de tamanhos variados, dispersos pela área com a maioria concentrados em profundidade superiores a 5m, porém também fragmentos dispersos entre 1 e 4 m de profundidade, com tamanhos variados (figura 6 A e B), com contato do solo arenoso e friável variando até 1,5 m de profundidade, sendo a aquisição de dados obtida com direção SW-NE, e a seção com aproximadamente 40 metros de extensão.



Figura 5 - Local da aquisição de dados da linha 2.
Fonte: Marques (2016).

Foi obtida a seção perpendicularmente ao talude com direção SW-NE, com aproximadamente 40 metros de extensão, onde na seção radargrama (figuras 6 A e B), foi constatado entre 1 e 2 metros de profundidade o contato entre o solo friável e o solo compacto, presença de formas hiperbólicas indicando fragmentos de tamanhos variados espalhados por toda a seção. Na figura 6 se tem a seção radargrama não processada e processada.

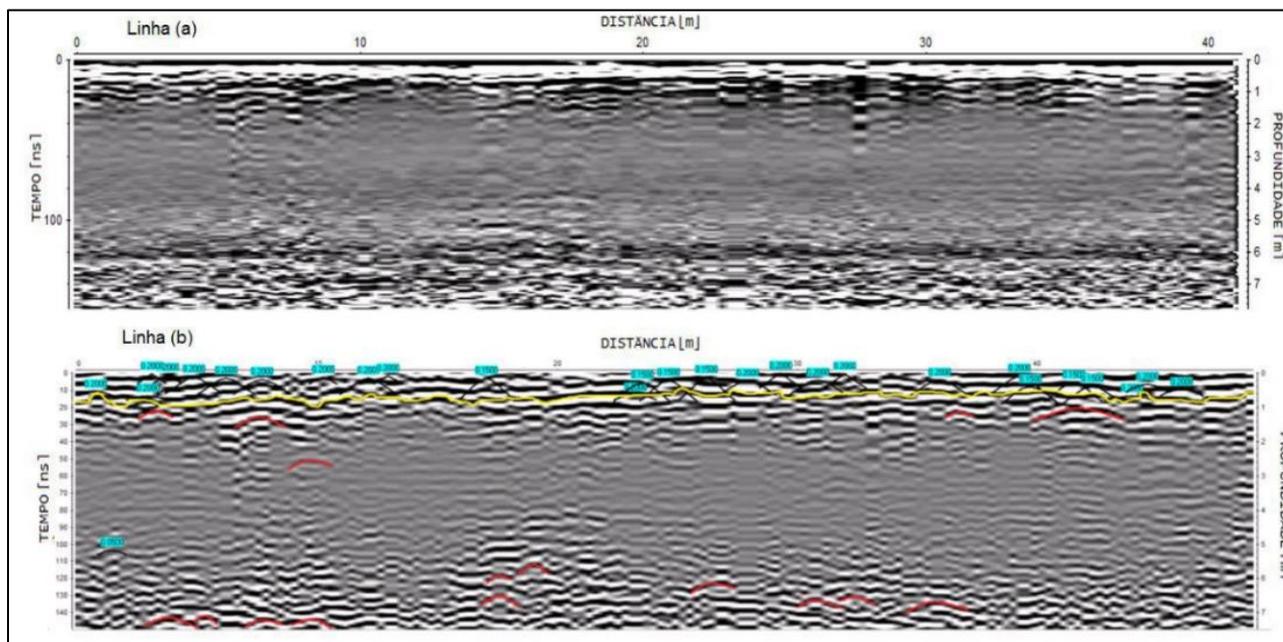


Figura 6 - (A) Linha 2 não processada. (B) linha processada. Ambas na Rua Mato Grosso em Quitandinha.
Fonte: Marques (2016).

2.2 Método ERT

O ERT é baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, onde em conjunto com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, indicam as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas. Para isso é utilizado uma corrente elétrica artificial contínua ou alternada de baixa frequência (menos de 10 Hz) na área de estudo, através de dois eletrodos localizados na superfície, a fim de medir o potencial gerado entre dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente. Os materiais geológicos possuem propriedades como resistividade elétrica, a qual é indicadora de algumas características de estados em relação a algumas propriedades como alteração, faturamento e saturação.

Segundo Loke (2002), e criado por DEY e MORRISON (1979), o programa RES2MOD é gratuito e fornecido em conjunto com o RES2DINV. Nele é possível calcular a pseudo-seção teórica de resistividade aparente para um modelo de subsuperfície 2D definido pelo usuário, com o programa aceitando diversos arranjos, sendo no cálculo das resistividades aparentes é possível serem utilizadas rotinas de diferenças finitas ou de elementos finitos. O programa (RES2DINV, 2003) possui a rotina de inversão baseada no método dos mínimos quadrados com vínculos de suavização restringida (*smoothness-constrained least-square inversion*). Uma das maiores vantagens de se utilizar esse método é poder ajustar de acordo com diferentes tipos de dados que se quer obter, com base nos fatores de amortecimento e nivelamento dos filtros.

A aquisição dos dados ERT foram realizadas através do equipamento de eletrorresistividade *Syscal kid Switch-2* com 24 eletrodos, tendo como base o arranjo dipolo-dipolo, com a técnica de caminhamento elétrico com espaçamento entre os eletrodos de 2 m. A simulação de dados feita no programa RES2DMOD foi realizada a fim de auxiliar na interpretação dos dados geofísicos, a seção escolhida para criação do modelo foi de aproximadamente 98 m de extensão com base na junção das seções de radargrama das linhas 1 e 2 (figura 4 B e figura 6 B), com espaçamento entre os eletrodos de 2 m entre eles, por ser a mesma configuração usada em campo, com o arranjo dipolo-dipolo.

No modelo se delimitou o contato do embasamento (cor laranja) com o solo compacto (cor verde) e fragmentos de rocha (cor amarela) além pontos indicando saturação de água (cor azul), por ter sido observados durante a aquisição em campo. Os valores de resistividade do modelo foram fundamentados na resistividade das rochas e solo encontrados no local de estudo (figura 7). Obtendo-se um parâmetro comparativo de interpretação entre a seção de resistividade aparente simulada (figura 8) com a seção de resistividade da aquisição dos dados de campo processados no programa RES2DINV (figura 9), os resultados mostram um modelo geoeletrico satisfatório para a interpretação do modelo geológico.



Figura 7 - (A) Equipamento Syscal kid Switch-24 . Fonte: Directindustry (2022). (B) Aquisição de dados em campo. Fonte: Autores (2022).

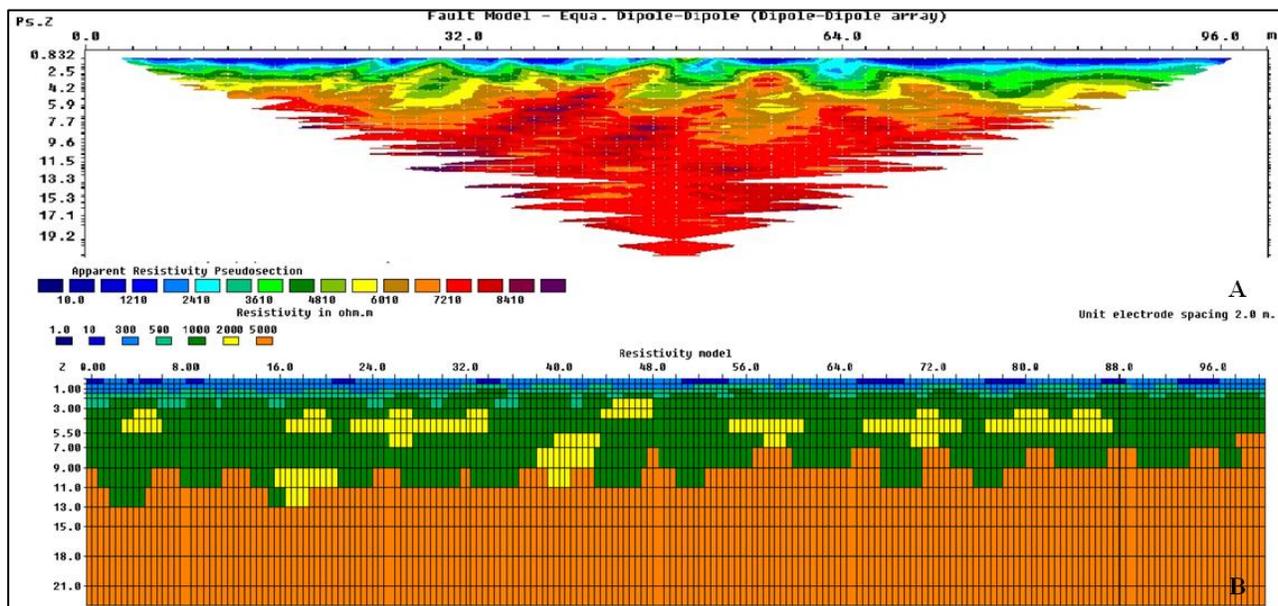


Figura 8 - (A) Pseudo-seção de resistividade aparente gerada. (B) Modelo de eletrorresistividade feito no programa RES2DMOD.
 Fonte: Autores (2022).

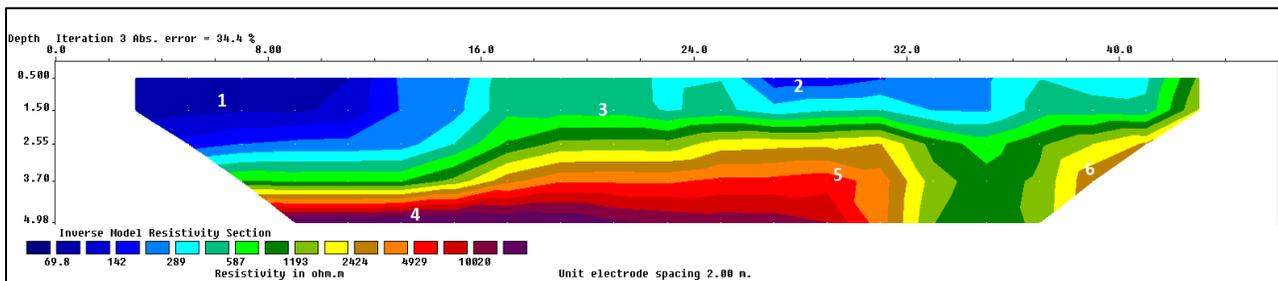


Figura 9 - Seção de resistividade realizada na Rua Mato Grosso.
 Fonte: Autores (2022).

3. Localização e caracterização

O município de Petrópolis está localizada na Região Serrana, pertencente à cidade do Rio de Janeiro, em uma altitude superior a 838 m, área total de 795,798 km² que corresponde a 1.8% da área do Estado do Rio de Janeiro e 11,55% da Região Serrana, com aproximadamente 306.002 moradores. É limitado por São José do Vale do Rio Preto ao Norte, por Teresópolis e Magé a leste, Duque de Caxias e Miguel Pereira ao Sul e Paty de Alferes, Paraíba do Sul e Areal a Oeste, segundo IBGE (2005), mostrado na figura 10. Também pode ser subdividido em cinco distritos (figura 1B), estando o bairro de Quitandinha localizado no primeiro, tendo o distrito tem uma área total de 143 Km². Segundo Gonçalves e Guerra (2006) por ser o distrito mais populoso de Petrópolis, além das características físicas, é também o com maior número de casos relacionados a movimento de massa.

O principal acesso ao município de Petrópolis se dá através da BR-40, rodovia que liga o Rio de Janeiro com o Distrito Federal, passando por Juiz de Fora e Belo Horizonte. Porém, também é possível através da BR-495, rodovia que interliga o distrito de Teresópolis com Itaipava, chegar à BR-40. Em relação à Baixada Fluminense em direção a Petrópolis, é possível chegar através da RJ-107, que conecta a serra com Magé, conforme pode ser visto na figura 10. Também pode ser acessado pelas coordenadas (22°31'14''S e 43°13'5''W).



Figura 10 - Mapa com as principais vias de acesso a Petrópolis, com marcação da Rua Mato Grosso.

Fonte: Google Earth™.

A cobertura vegetal típica de Petrópolis é formada por floresta ombrófila densa devido ao clima tropical, onde o bairro de Quitandinha está delimitado pela cor azul, no local de estudo ocorreu desmatamento da cobertura florestal típica da área a qual apresenta raízes superficiais, sendo um fator que aumenta as chances de deslizamento de massa (figura 11).

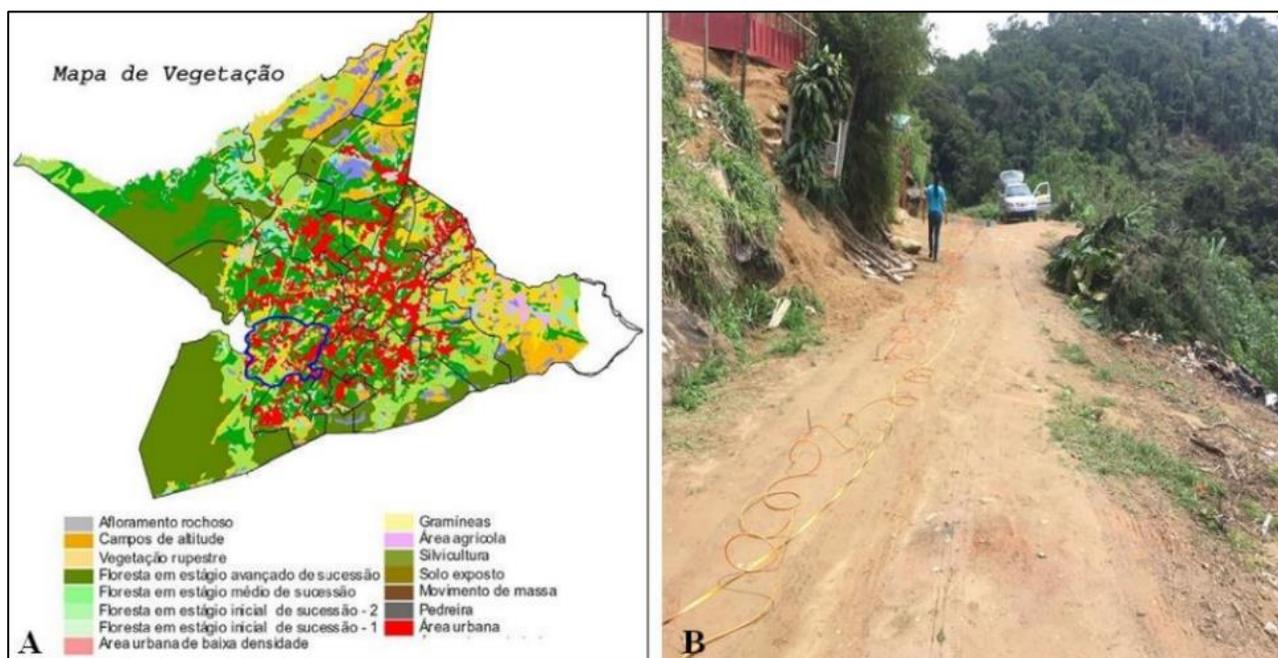


Figura 11 - (A) Mapa de vegetação do primeiro distrito com delimitação do bairro de Quitandinha em verde, sem escala. Fonte: adaptado de Varanda (2006). (B) Desmatamento na rua Mato grosso em Quitandinha.

Fonte: Autores (2022).

Petrópolis faz parte da unidade geomorfológica da Serra dos Órgãos, com município inserido na Região das Escarpas e Reversos da Serra do Mar, formado por um relevo montanhoso, com uma ampla variedade de escarpas e declividades. A variação de 10° até 30° são características de áreas com predomínio de aluviões e colúvios, entre 30° e 45° em sua maioria típica de áreas de colúvios e solos residuais maduros, de 45° e 60° com predomínio de áreas de colúvios e solos residuais, Varanda (2006), figura 12.

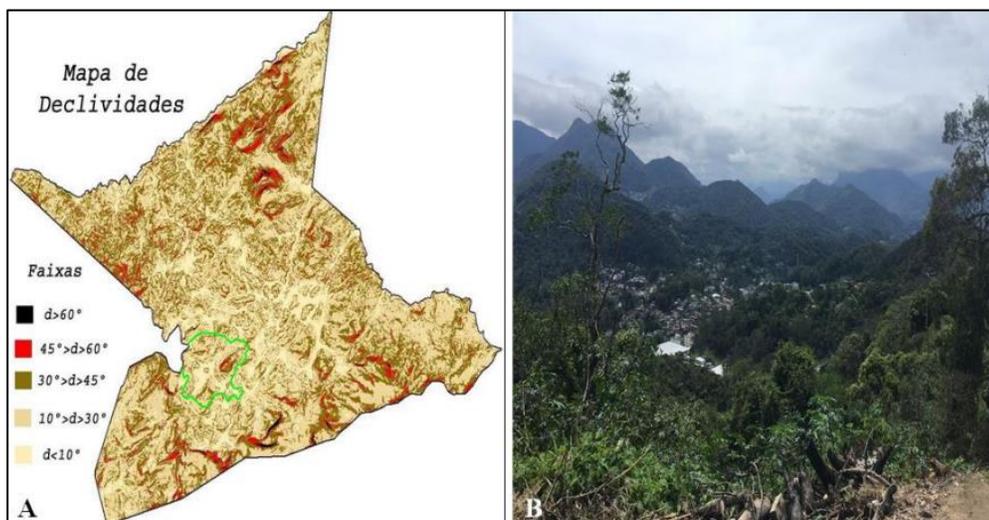


Figura 12 - (A) Mapa de declividade do primeiro distrito com delimitação do bairro de Quitandinha em verde, sem escala.

Fonte: Adaptado de Varanda (2006). (B) Relevo de Petrópolis através da rua Mato Grosso.

A Serra do Mar é composta por grande parte de granitos e gnaisses, estando no Complexo Cristalino Brasileiro, Salgado (2013). Os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo, com base em Guerra et al.(2007 p.81) são constituídos por migmatitos e granitóides de Petrópolis com idade Pré-Cambriana, extremamente fraturados e falhados, sendo, portanto propícios para o aumento dos índices de deslizamentos de terra, principalmente em locais de ocupação inadequada em encostas. Também se encontram sedimentos do Quaternário em áreas fluviais, como no rio Piabanha, figura 13. O bairro de Quitandinha, localizado no primeiro distrito está contido na folha de Petrópolis 1:50.000, com afloramento das rochas de Unidade Rio Negro (Unidade Santo Aleixo e Bingen), foram mapeados por Penha et al. (1979). Para Varanda (2006), predominam na área a Unidade Bingen constituída por biotita-gnaisses graníticos. Já na Unidade Santo Aleixo, tem contato transicional com a Unidade Bingen, sendo composta por migmatitos.Com base em Guerra et al. (2007, p. 81), os solos predominantes da região são o Latossolo vermelho-amarelo e o Argissolo vermelho-amarelo. Porém, também se encontram Cambissolos.

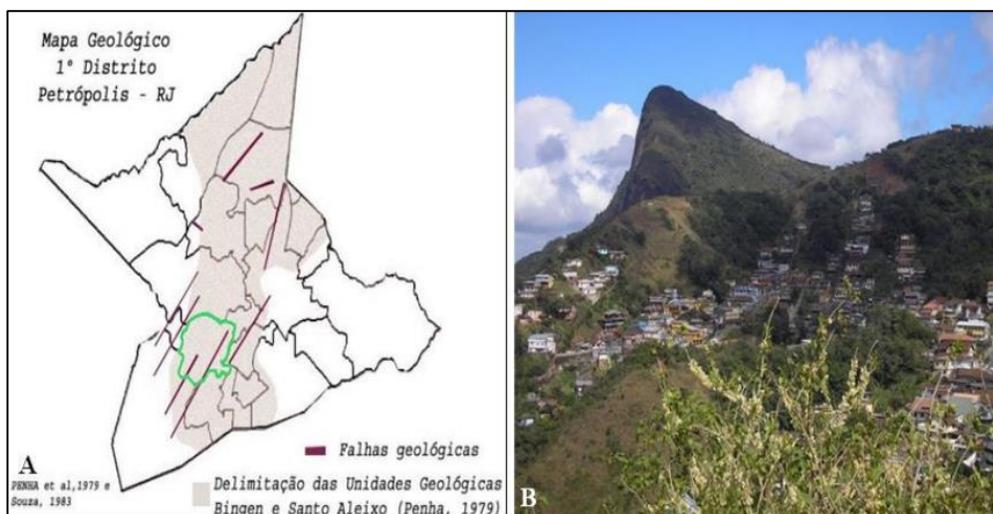


Figura 13 - (A) Mapa geológico do primeiro distrito, Quitandinha delimitada em verde. Fonte: adaptado de Penha et al. 1979 e Souza, 1983). (B) Falha geológica no bairro de quitandinha em Petrópolis, na parte Sul do primeiro distrito.

Fonte: Varanda (2006)

Segundo Marques (2006), o bairro de Quitandinha possui poucos afloramentos com rocha sã e solos bem intemperizados, com variações de cores e granulometria, onde, visitas técnicas à Rua Mato Grosso em Quitandinha, foi constatado a presença de solos com granulometria variando de areia fina a média, silte e argila. Varanda (2006) também realizou uma análise pedogenética do solo do primeiro distrito (Petópolis) do Município de Petrópolis, constatando a presença de solo raso em Quitandinha, com camadas de variações entre 1 a 2 metros sobre os afloramentos, com solos possuindo blocos variando de centímetros a metros, podendo ter grandes quantidades de matéria orgânica, figura 14.



Figura 14 - Solo raso (Neossolo) localizado em Quitandinha.

Fonte: Varanda (2006).

Com altitudes de 250 m e os 1.600 m de altitude o clima é definido com “tropical mesotérmico, brando, super úmido”, sendo coincidente com a altitude do município de Petrópolis, mesmo a região estando sob área de predomínio tropical. Porém, com base em Hack et al. (2003), podem ocorrer grandes variações de temperaturas devido ao encontro das massas Tropical Atlântica e Polar, gerando diminuição nos índices de pluviosidade e a criação de nevoeiros durante o inverno. Já no verão, esse fenômeno causa chuvas intensas com trovoadas, além do aumento da velocidade do ar, devido à altitude topográfica da cidade.

Segundo Canedo (2011), a maioria das chuvas no município de Petrópolis são causadas pelo acumulo de massas úmidas vindas da planície de Magé, levadas pelos ventos para a serra de Petrópolis, caracterizadas por três diferentes entradas, uma pelo sul no vale do rio Palatino, a segunda através do vale dos rios Quitandinhas, por sudoeste, e a última pelo vale do rio Itamarati, pelo leste, sendo as que provocam mais chuvas as vindas dos rios Palatino e Quitandinha. Outros fatores que contribuem são a elevada altitude e a proximidade da encosta com o mar, que acaba retendo umidade, com índice pluviométrico anual da cidade variando entre 1500 mm e 2600 mm, no verão com valores superiores a 200 mm/mês, de acordo com Oliveira et al. (2003).

Durante os períodos mais chuvosos o número de movimentos de massa sofre um aumento, pois o solo sofre um aumento em sua massa, além da diminuição de sua coesão devido à elevação do grau de saturação. Guidicini e Nieble (1984), indicam que a elevação dos índices de movimentos de massa é causado pela quantidade de água no solo, pois ao se infiltrar, a água ocupa os vazios no solo, conseqüentemente exercendo pressão nos grãos (poropressão).

4. Movimentos de massa da área de estudo.

Em relação à intensidade do deslizamento, para Guidicini e Nieble (1984), os movimentos de massa variam com base no tipo de morfologia, geologia e geomorfologia do terreno, aliados com os parâmetros antrópicos, caso ocorram em áreas que tenham ocorrido intervenção humana, tais como construções irregulares ou desordenadas, desmatamento, poluição e contaminação do solo. Em relação ao material envolvido no movimento de massa, Hungr et al. (2001) propõe a divisão com base em terra, lama e detritos para os movimentos de fluxo.

Segundo Leroueil et al. (1996), todos os tipos de movimento de massa passam por quatro estágios de desenvolvimento, pré-ruptura, ruptura, pós-ruptura e o estágio de reativação, que ocorrem em seqüência. Os movimentos de massa podem ser classificados com base em fatores de cinemática do movimento, tipo de material que é composto o terreno, e geometria. A cinemática do movimento é baseada no deslocamento na massa, em função da velocidade, direção e seqüência de deslocamentos. O tipo de material é definido com base na matéria que sofreu o deslocamento, como o solo, rocha, detritos, dentre outros. Quanto mais lento for o movimento do deslocamento, o tipo de movimento será o de rastejo, podendo ser o material seco ou úmido, se for ocorrer de forma rápida e seca, o tipo de movimento característico é a queda.

A velocidade dos movimentos de massa pode ser classificada e estimada de acordo com a Sociedade Internacional de Geotecnia da UNESCO (WP/WLI, 1995) e Cruden e Varnes (1996), onde a resposta ao movimento varia de acordo com a sua descrição. Para Hungr et al. (2014), devido a grande variedade de classificações possíveis, o termo que cada pesquisador irá usar em sua pesquisa e trabalho deve se basear no que apresenta a maior variedade de informações, com isso, evitando-se unir mais de um tipo de movimento, logo, cada termo selecionado para um movimento de massa específico deve representar o foco particular do pesquisador, e que, por exemplo; uma classe definida como complexa não tem utilidade porque quase todos os movimentos de massa são complexos. Em presença de um movimento complexo, a terminologia utilizada deve incluir a maior parte da informação sem precisar mencionar outro tipo de movimento.

Augusto Filho (1994) caracterizou 53 tipos de movimentos de massa em quatro grupos com base nas suas características, sendo eles: rastejos (*creep*), escorregamentos (*slides*), corridas (*flows*) e quedas de blocos (*falls*). Sendo que os principais tipos de movimentos de massa que atinge as regiões do Rio de Janeiro, são: queda de blocos (GEORIO, 2014), tombamento (OLIVEIRA, 2004), escorregamento (AUGUSTO FILHO, 1992; GUIDICINI & NIEBLE, 1984; OLIVEIRA, 2004), rastejo (SILVA, 2006; OLIVEIRA, 2004) e corrida (SILVA, 2006).

Segundo Nakazawa e Cerri (1990), por Petrópolis possuir grandes declividades no terreno, os movimentos mais frequentes são os de ocorrência rápida como, por exemplo, os escorregamentos planares e quedas de blocos, sendo os mais comuns os escorregamentos, em função da maioria das áreas possuírem encostas com declividade entre 10 e 45°. Quitandinha possui áreas com níveis de suscetibilidade variando de baixa até alta (figura 15), pois, o ângulo de declividade do terreno pode influenciar no tipo de movimento de massa que pode ocorrer na área, assim, encostas com declividade abaixo de 10°, são menos suscetíveis ao movimento de massa devido à baixa declividade do terreno, sendo assim consideradas como encostas estáveis (VARANDA, 2006). Declividades entre 10 e 30° são mais suscetíveis a movimentos de massa do tipo rastejo e escorregamento. Entre 30 e 60° podem ocorrer escorregamentos com velocidades maiores de acordo com o ângulo da encosta. Nas encostas com declividades superiores a 60° são mais comuns movimentos de massa do tipo queda de fragmento por conta da alta declividade (VARANDA, 2006).

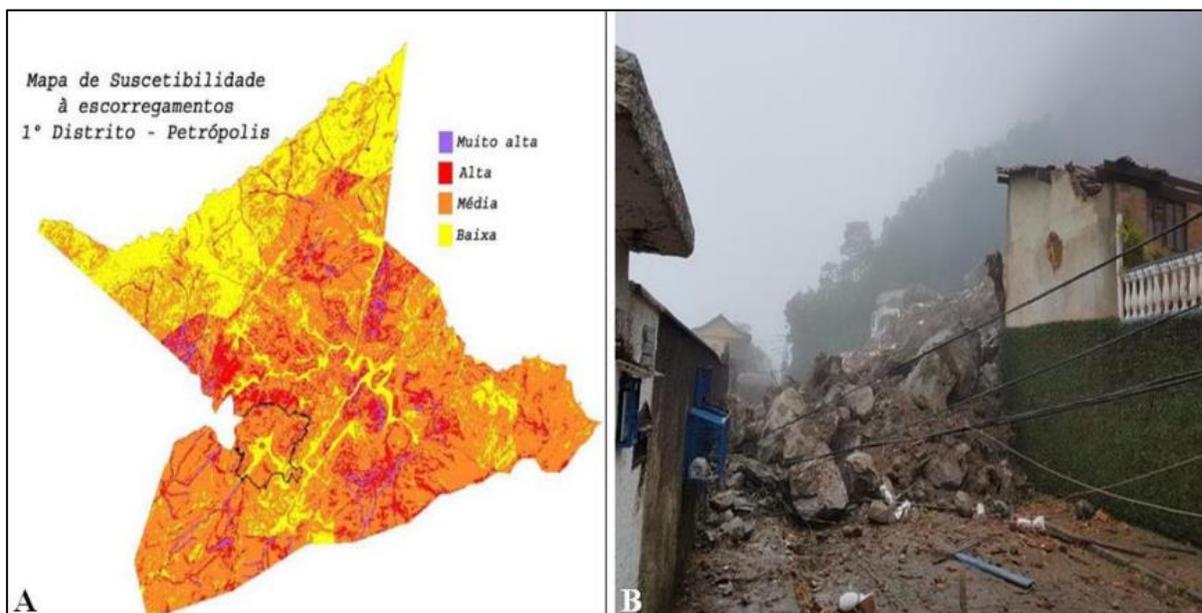


Figura 15 - (A) Mapa de suscetibilidade de escorregamentos. Fonte: Varanda (2006), adaptado pela autora. (B): Escorregamento registrado no bairro de Quitandinha em 2017. Fonte: G1 (2017).

No bairro de Quitandinha, os movimentos de massa mais frequentes são de rastejo e escorregamento, onde em 2017, na Av. Ayrton Sena, causou destruição de moradias . Porém, também podem ocorrer quedas de fragmentos (figura 16A). Já em 2022, as fortes chuvas de verão causaram mais de 700 deslizamentos por toda cidade de Petrópolis, além do alagamento de ruas deixando mais de 238 óbitos e centenas de desabrigados, com o movimento de massa do tipo corrida causador do maior número de vítimas (figura 16B), pois os moradores não tiveram tempo para deixar suas residências.



Figura 16 - (A) Quedas de blocos registrada no bairro de Quitandinha em 2017. Fonte: G1 (2017). (B) Corrida no Morro da Oficina (Petrópolis) Fonte: Folhapress (2022).

5. Resultados e interpretações

O contato entre o embasamento e solo friável observado entre as profundidades de 7 m e 13 m, se deu por meio da aquisição da seção de eletrorresistividade obtida em campo, levando-se em consideração o fato de não ter sido detectado nas seções de radargrama, em profundidade de até 7 m. No contato entre o solo friável e o solo compacto entre as profundidades de 1 m e 2 m aproximadamente, podem ser observadas profundidades similares aos da seção de eletrorresistividade com o RES2DINV, sendo respectivamente caracterizados pelos valores de resistividade de 300 ohm.m (coloração verde água) e 500 ohm.m (cor azul claro). Os pontos de simulação de saturação de água, com valores de resistividade variando até 100 ohm.m (cor azul escura), indicaram percolações de água de profundidade variadas, de até 3.5 m, o qual também são condicentes com os da seção obtidas com o programa RES2DINV. Já o contato entre o solo compacto e o embasamento ocorre de forma brusca com grandes variações de profundidade e comprimento, sendo na seção gerada pelo RES2DINV, o contato de forma suave, com poucas variações de profundidade. Os blocos espalhados, indicados pelas cores amarela, verde escuro, e verde claro, com valores de resistividade variando de 300 até 2.000 ohm.m, possuem similaridade de profundidade e tamanho com os observados na seção obtida pelo RES2DINV.

A seção transversal de resistividade gerada no programa RES2DINV, após o processamento de dados, indicam que um tipo litológico pode possuir uma ampla variedade nos valores de resistividade, tendo como base os valores de resistividade para sedimentos não saturados e saturados, e rochas, já conhecidos. Assim, em solos secos, com localização acima do nível d'água, os valores de resistividades dos solos são considerados atípicos por possuírem uma ampla faixa de variação (tais como 100 a 10.000 ohm.m), os quais são constatados na seção obtida com o programa RES2DINV, pelo fato da aquisição ter sido realizada em uma altitude de 1034m.

Nas regiões 1 e 2 (Figura 9), é possível observar áreas de baixa resistividade, indicando ser zonas de saturação, que se formaram por conta da declividade e elevação do terreno. Na região 1, uma zona de saturação mais profunda com cerca de 3.5 m e 16 m de extensão, devido a maior proximidade da zona de vale, sendo um ponto de escoamento da área, podendo ser a zona de vale. Na região 2, caracterizado pelo acúmulo de água da chuva, que se infiltra até cerca de 1,5 m de profundidade e aproximadamente 10 m de extensão, podendo ter sido causado pelo desmatamento do local, elevando os riscos de novos deslizamentos ou remobilização do solo, por ter diminuído a sua coesão, principalmente na região 1, onde a percolação de água ocorre de forma mais intensa.

O contato entre o solo friável e o solo compacto ocorre entre 1 e 2,5 metros de profundidade em grande parte da seção radargrama (Figuras 4 e 6), definido pela mudança de cor entre o azul escuro e o azul claro, o qual pode ser observado nas duas seções de GPR, aproximadamente na mesma profundidade, sendo o contato mais profundo na área 1, pela presença de drenagem de água, estando entre 2 e 3m de profundidade. No ponto 3, é possível observar uma área de solo compacto, que delimita as áreas onde ocorre as saturações nas áreas 1 e 2, indicados pela diferença de cor azul claro para a verde água, sendo também é possível observar a variação de profundidade entre as camadas de solo compacto e friável, assim como ocorre nas seções de GPR das linhas 1 e 2. No ponto 4, se tem rochas do embasamento, devido aos altos valores de resistividade, superiores a 5.000 ohm.m (cor vinho escuro), que se localizam em uma profundidade superior a 4.5 m e uma extensão de aproximadamente 30 m. Já nos pontos 5 e 6, podem ser caracterizados por blocos de diversos tamanhos, espalhados pela área com resistividade variando entre 2.500 ohm.m e 3.000 ohm.m (coloração amarronzada), em profundidade superior a 3m, sendo também encontrados na linha 2 da seção de GPR.

O uso do método do GPR se mostrou mais eficaz em relação à eletrorresistividade para a identificação do local exato e tamanho dos blocos espalhados pela área de estudo. Porém, através do método de eletrorresistividade, foi possível obter os locais em que ocorrem saturação de água, e a identificação da presença de blocos espalhados pelo local. Logo, para um estudo mais detalhado da estabilidade de taludes, é recomendado a utilização dos dois métodos geofísicos, por serem complementares e eficazes para o estudo ambiental.

6. Considerações finais

A correlação dos métodos geofísicos de GPR e Eletrorresistividade aliados com estudo da geologia regional e local se mostrou uma boa estratégia para a verificação dos típicos de movimentos de massa na área de estudo, assim como a estabilidade do talude. Através da análise dos dados geofísicos aliados a estudos sobre deslizamentos na área, é possível concluir que o talude apresenta risco médio de deslizamento, devido a ocorrer pontos com mais de 8 m de comprimentos com saturação de água no solo em profundidades superiores a 1 m, onde se encontram o contato do solo compacto com o solo friável. Agravado pela intensificação do desmatamento do local para a construção de moradias e uso irregular do solo, tais como: concentração de lixo, entulho, e remobilização do solo, indicando que pode correr a qualquer momento um

movimento de massa na área estudada, sendo necessário um estudo mais detalhado e urgente para remediar e controlar a situação do solo no local.

Uma alternativa para minimizar os riscos de deslizamentos de terra, é fazer o mapeamento geofísico de GPR e ERT por toda a Rua Mato Grosso, para identificar todas as áreas com passagem de drenagens, blocos soterrados e zonas de infiltração, com isso detectar os locais com uma maior probabilidade de deslizamento, para que sejam determinadas as áreas de alto risco, sendo possível a elaboração de planos de evacuação, assim como a criação e aplicação de técnicas para minimizar o movimento do solo. Pois, a presença de diversos blocos espalhados pelas camadas das seções de GPR e Eletrorresistividade, indica que já ocorreram diversos movimentos de massa na Rua Mato Grosso, sendo eles de média até alta energia por conta do tamanho dos blocos transportados.

Também é preciso fiscalização mais intensa a respeito da construção de moradias, por conta das crescentes construções irregulares no local, que geram desmatamento da mata que contribui para adese estabilização do talude, assim como o aumento da quantidade de lixo espalhados pela rua e falta de saneamento básico, onde o esgoto das casas é jogado diretamente na rua, sem nenhum tipo de tratamento, fazendo com que ao se infiltrar no solo gerem desagregação dos componentes do solo.

Referências

- AGENCIABRASIL. **Sobe para 232 número de mortos na tragédia de Petrópolis**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-03/sobe-para-232-numero-de-mortos-na-tragedia-de-petropolis>. Acesso em 07/01/2022.
- AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização Geológico-Geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. pp. 721-733, Rio de Janeiro. 1992
- AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP**. São Paulo.162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. 1994.
- BRAGA, A. C. D. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Centro - São Paulo/SP, 2006.
- CANEDO, PAULO. **Mitigação das Cheias: Proteção do Centro Histórico de Petrópolis**. Palestra apresentada na 5ª Reunião Extraordinária do Comitê Piabanha em 22/09/2011.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslide types and processes**. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. Landslides investigation and mitigation. Washington, DC: Transportation research board. Cap. 3, p. 36-75, 1996,
- DEY, A. ; MORRISON, H. F. Resistivity Modelling for Arbitrary Shaped Two-Dimensional Structures. **Geophysical Prospecting**. cap27,pp 1020-1036, 1979.
- DIRECTINDUSTRY. **Syscal kid Switch-24**. Disponível em <https://pdf.directindustry.com/pt/pdf-en/iris-instruments/syscal-kid-switch/236717-955448.html>. Acesso em 30 de novembro de 2022.
- FOLHAPRESS. Acesso em: março de 2022. Disponível em [https:// folhapress.folha.com.br/paginas/imagens/bancodeimagens/index.shtml](https://folhapress.folha.com.br/paginas/imagens/bancodeimagens/index.shtml) .
- G1. **Chuva na madrugada desta segunda causa deslizamentos em Petrópolis**. 20 de março de 2017. Acesso em: 03/05/2017.Disponível:<https://g1.globo.com/rj/regiaooserrana/noticia/2017/02/deslizamentos-atingem-casa-e-estrada-durante-chuva-em-petropolis.html>.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2a Edição. São Paulo. Oficina de Textos. 2016.
- GEO. **Manual Técnico de Encostas. Análise e Investigação**. Fundação Instituto de Geotecnia do instituto do Rio de Janeiro. Prefeitura do Rio de Janeiro. Organizadores:Hélio Brito, Alberto Ortigão, Alberto Sayão, . 2014, v.1. Acesso

em: 02/05/2017.
Disponível:https://www.terratek.com.br/_files/ugd/b4e06f_f7d27aa305f0469684ce79193b1f3e7d.pdf

GONÇALVES, L.F.H. ; GUERRA, A.J.T. **Movimentos de Massa na Cidade de Petrópolis** (Rio de Janeiro). In: Guerra, A.J.T. & Cunha, S.B. (Orgs.). *Impactos Ambientais Urbanos no Brasil*. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil. p. 189-252, 2006

GOOGLE. Google Earth website. <http://earth.google.com/>, 2020.

GUERRA, A. T. ; LOPES P. B.M; FILHO SANTO, R. Características geográficas e geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - Ano 8, nº 1, 2007. Disponível em http://www.ugb.org.br/home/artigos/RBG_8_1/6_RBG_F.pdf. Acesso em: 08 de outubro de 2021.

GUIDICINI, G.: NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais de escavação**. 2ª Edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. 216 p.

GUERRA, A. J. T. ; JORGE, M. C. O. **Desastre na Região Serrana -Petrópolis - RJ**. Lagesolos/ UFRJ, 2014. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/externas/54a-legislatura/desastres-na-regiao-serrana-do-rio-de-janeiro/audiencias-publicas-1/apresentacao-do-prof.-dr.-antonio-jose-teixeira-guerra-professor-da-ufRJ>. Acesso em: 20 de julho de 2021.

HACK, Lucy Pinto, NEVES, S.; HUTTER, M.H. As mais recentes calamidades pluviais ocorridas em Petrópolis: os episódios de 2001 e 2003. **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Anais**. Rio de Janeiro: UERJ. 11 p. 2003. Disponível em <http://geografia.igeo.uerj.br/xsbgfa>. Acesso em: 25 de julho de 2021.

HIGHLAND, L.M., BOBROWSKY, P. **O Manual de Deslizamento: Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, Tradutores: Paulo R. G. Rogério; Juarês José Aumond. 2008.

HUNGR, O. *et al.* A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. VII, n. 3, p. 221-238, 2001

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**. n. 11, p. 167-194, 2014

IBGE . Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Setor Censitário. Rio de Janeiro: IBGE, 2005.

LEROUEIL, S.; VAUNAT, J.; PICARELLI, L.; LOCAT, J.; LEE, H.; FAURE, R. M. **Geotechnical characterisation of slope movements**, In: K. Senneset (ed.), Proc. of 7th Int. Symp. on Landslides, Balkema, Rotterdam, pp. 53–74, 1996

LOKE, M. H. **RES2DMOD** ver. 3.01 for Windows 95/98/Me/2000 and NT – Rapid 2D Resistivity Forward Modelling Using the Finite-Difference and Finite-Element Methods. M. H. Loke Software User’s Manual, 2002.

MARQUES, M. S. **O estudo da estabilidade de encostas na rua Mato Grosso no Bairro de Quitandinha, Petrópolis – RJ, através do Radar de Penetração do solo (GPR)**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro , 2016.

NAKAZAWA, V.A. ; CERRI. T.E.S., Os Escorregamentos Ocorridos em Petrópolis – Rj em fevereiro de 1988: Ações Emergenciais. **I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano**. pp 325-333, São Paulo, 1990

OLIVEIRA, F. L.; GUERRA, A. J. T. & GONÇALVES, L. F. H. “Análise comparativa dos dados históricos de movimentos de massa ocorridos em Petrópolis RJ, das décadas de 1960 até 1990”. In: **X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. pp. 1175 a 1180, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, L. C. D. E. **Análise Quantitativa de Risco de Movimentos de Massa com Emprego de Estatística Bayesiana**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2004.

-
- PENHA, H. M et. al.. **Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro- Convênio DRM/IG –UFRJ - Projeto Folha Petrópolis**, Vol. I, Relatório Final,(Inédito).256 pp.1979.
- RES2DINV, G. S. **Rapid 2-D Resistivity and IP inversion using the least-squares method**, vers. 3.4., Geotomo Software, 2003
- SALGADO, J. C. R. S. S. **Avaliação e Modelação da Suscetibilidade de Movimentos de Vertente Superficiais Translativos em Nova Friburgo**. Dissertação de Mestrado. Faculdade De Letras. Universidade do Porto, Porto, 2013.
- SILVA, D. C. O. **Aplicação do modelo shalstab na previsão de deslizamentos em Petrópolis**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2006.
- SOUZA, L. A. D.E. **Geologia da Região de Itaipava-Araras (RJ)**. Tese (Doutorado em Geologia),Programa Pós-Graduação em Ciências (Geologia), IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1983.
- VARANDA, E. **Mapeamento quantitativo de risco de escorregamentos para o primeiro distrito de Petrópolis, RJ utilizando sistemas de informações geográficas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 2006.
- VARNES, D.J. **Landslide Harzard Zonation a Review of Principles and Practice**. Natural Harzard, 3, UNESCO, Serial: Natural Hazards, Issue Number: 3, Publisher: United Nations, 63p.
- WP/WLI. International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI). A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, 52, p.75-78, 1995.