

CARTA GEOTÉCNICA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA A PARTIR DO MAPEAMENTO DE ÁREAS COM SEMELHANÇAS GEOMORFOLÓGICAS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO TIAGO (MG)

THIAGO AUGUSTO DE CASTRO E SOUZA, TALITA CAROLINE MIRANDA, DENISE DE FÁTIMA SANTOS DA SILVA

Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, 31270-901. E-mail: thiagoaugusto93@gmail.com; talita@etg.ufmg.br; denisefss@yahoo.com.br

Resumo - As cartas geotécnicas surgem da necessidade de caracterização do comportamento dos terrenos, oferecendo uma visão espacial e simplificada dos parâmetros de interesse a projetos de expansão de infraestruturas urbanas para os gestores municipais. O presente trabalho propôs o estudo para a zona urbana de São Tiago (MG) a fim de elaborar uma carta geotécnica de suscetibilidade para o município. A motivação para o estudo foi um escorregamento ocorrido em fevereiro de 2017 numa rua do centro do município. Dada a ocorrência e os transtornos advindos, vislumbrou-se a necessidade da investigação sobre os solos da região, inserida no domínio morfoclimático Mares de Morros, caracterizado por terrenos antigos e processos erosivos intensos. Por meio da sobreposição de dados cartográficos de pedologia, geologia e modelo digital do terreno, associada a investigações de campo para refino, foram obtidas unidades de comportamento pela interação dos solos com seus substratos e as feições do relevo, denominadas unidades geotécnicas. A partir da realização de retroanálise do escorregamento ocorrido e a execução de análises sobre modelos representativos em cenários-padrão, obteve-se o comportamento das unidades identificadas, e os resultados balizaram a classificação de suscetibilidade quanto a movimentos de massa e processos erosivos na área de estudo.

Palavras-Chave: Cartas geotécnicas; Unidades Geotécnicas; Mapeamento Geomorfológico; Escorregamentos; Suscetibilidade.

Abstract - The geotechnical maps arise from the need of characterize the behavior of lands, offering a spatial and simplified view of the parameters of interest to urban infrastructure expansion projects for municipal managers. The present work proposed the study for the urban area of São Tiago (MG) in order to elaborate a geotechnical susceptibility map for the municipality. The motivation for the study was a landslide that occurred in February 2017 on a street in the center of the city. Given the occurrence and the resulting disturbances, there was a need for research on the soils of the region, inserted in the morphoclimatic domain Mares de Morros, characterized by ancient terrains and intense erosive processes. By superimposing cartographic data from pedology, geology and digital terrain model, associated with field investigations for refining, behavior units were obtained by the interaction of soils with their substrates and relief features, called geotechnical units. From the performance of reatransanalysis on the landslide that occurred and execution of analyzes on representative models in standard scenarios, the behavior of the types of units identified was obtained, and the results guided the classification of susceptibility regarding mass movements and erosive processes in the study area.

Keywords: Geotechnical Maps; Geotechnical Units; Geomorphological Mapping; Landslides; Susceptibility.

1. INTRODUÇÃO

A expansão de cidades e núcleos urbanos implica em uma série de desafios no planejamento dos recursos e infraestruturas para as regiões dentro da direção de seu(s) vetor(es) de crescimento e em seu entorno. Para tanto, faz-se necessário o diagnóstico desses locais, à luz de estudos hidrogeológicos e geológicos, climatológicos, topográficos e dos tipos de solo presentes, assim como a investigação de importantes eventos anteriores tais como registros de enchentes históricas e escorregamentos, processos erosivos e outras informações a respeito da disponibilidade e qualidade dos recursos naturais presentes, com a devida interdisciplinaridade. Esse diagnóstico é essencial para a identificação das áreas que podem oferecer algum tipo de risco a vida e de danos e perdas materiais, patrimoniais e ambientais. Além disso, estes diagnósticos devem balizar o dimensionamento das futuras infraestruturas, a organização e ordenamento dos novos espaços urbanos e a definição dos zoneamentos para o uso e ocupação do solo, reduzindo os impactos ambientais e os riscos induzidos pela ação antrópica nesses espaços.

No entanto, o resultado da crescente ação humana sobre os recursos naturais tem causado grandes alterações nos regimes de precipitação em vários locais. Enquanto alguns lugares sofrem com períodos de estiagem cada vez mais prolongados e severos, outros estão experimentando volumes de chuva que não eram esperados dentro do tempo de retorno estimado (WAGENER e FRANKS, 2005). Como consequência, além do aumento do risco geológico em áreas urbanas que surgiram e cresceram marginais ao interesse público, ocorre também o surgimento de novos pontos de risco. Visto que os modelos hidrogeológicos e critérios de dimensionamento adotados anteriormente tornaram-se obsoletos ou não preveriam a magnitude das mudanças nos regimes pluviais dos novos locais, assim como outros parâmetros que impactam os fatores de

segurança e a vida útil das infraestruturas instaladas.

O aumento do risco geológico em razão das mudanças supracitadas traz particular preocupação em pequenos municípios e distritos no interior dos estados. Posto que, por razões que atravessam desde o orçamento destinado às prefeituras até questões políticas locais, é comum que esses municípios possam apresentar alguma carência de estudos mais detalhados sobre as bacias de contribuição que abrangem a cidade e as características dos solos e unidades geológicas presentes dentro de seus limites de abrangência. Como consequências, áreas que oferecem algum risco ou já apresentam processos de instabilidade, ocorrem de forma lenta e silenciosa, assim permanecem em desconhecimento da comunidade. Além disso, são realizadas tomadas de decisão equivocadas sobre projetos de pavimentação, redes de drenagem pluvial, remoção de cobertura vegetal e impermeabilização indevida do solo, que podem causar sobrecarga aos solos e também e aceleração dos processos erosivos existentes (AMARO et al., 2021).

Nas últimas décadas, o processo de expansão das cidades brasileiras culminou em uma intensa urbanização de áreas com maior suscetibilidade a movimentos de massa. De acordo com alguns autores (GUZZETTI et al., 2006) (SOBREIRA e SOUZA, 2012) a suscetibilidade é definida como a probabilidade de ocorrência de um movimento de acordo às características do terreno. Barella et al. (2019) enfatizam que a suscetibilidade é baseada no conceito de que novos eventos irão ocorrer nas mesmas condições que levaram a ocorrência em eventos passados, podendo assim, ser usado as informações das análises destes eventos para prever a localização geográfica eventos futuros. Vale ressaltar, que a suscetibilidade não se destina a prever o tempo ou a frequência de eventos, apenas sua localização espacial, conforme descrito por Guzzetti et al. (2005).

Segundo Araújo et al. (2021), a identificação das áreas suscetíveis é uma etapa fundamental na

gestão de riscos e auxilia a implementação de projetos que visam mitigar e evitar danos causados por estes eventos. Embora as técnicas de análise de suscetibilidade sejam cada vez mais robustas, métodos simples podem produzir modelos com boas capacidades preditivas (EIRAS et al., 2021). No Brasil existem diversos trabalhos que apresentam os resultados do mapeamento de suscetibilidade, tais como: Amaro et al. (2021) para o estado do Rio Grande do Norte, Rosa et al. (2021) para a cidade de Nova Lima (MG) e Araújo et al. (2021) para o estado do Rio de Janeiro. Porém, no Brasil a carência de dados cartográficos em escala adequada é fator limitante para o planejamento territorial de detalhe, conforme sugerem Cruz e Menezes (2009). Chilleto (2013) aponta que a situação se agrava à medida com que as periferias urbanas são ocupadas. Siqueira et al (2022) enfatizam que entre os principais requisitos cartográficos para o planejamento urbano, dependem de bases planialtimétricas e mapeamentos temáticos prévios. Porém, estes mesmos autores afirmam que muitas vezes os pequenos municípios não podem arcar com os custos para obtenção destes dados. Assim, torna-se necessária a proposição de métodos alternativos visando suprir a demanda cartográfica (SIQUEIRA et al., 2022).

Diante disto, o presente estudo propõe a análise de suscetibilidade a movimentos de massa para o município de São Tiago no estado de Minas Gerais, que possui uma população total de 10.979 habitantes segundo o IBGE (2021). Na área urbana, foi registrada a ocorrência de um escorregamento durante o período chuvoso na rua Joaquim Marquês da Silva, no dia 25 de fevereiro de 2017. Após, uma equipe do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foi mobilizada ao

local para oferecer apoio técnico de caráter geológico/geotécnico que levantou inicialmente as informações do escorregamento. O presente trabalho pretende aprofundar a análise para a compreensão do movimento, através de investigações do histórico local e avaliações in situ. Inicialmente já se foi observado, além de o local ser uma área de concentração de águas servidas da bacia, que o lençol freático no local está muito próximo à superfície, com pontos de afloramento, onde o solo apresenta cor escura e turfosa, portanto composto em grande quantidade por matéria orgânica, o que implica em características de alta compressibilidade e baixa resistência, conforme descrito por Antunes e Salomão (2018).

A ocorrência desse tipo de solo é predominante no entorno do antigo núcleo urbano de São Tiago, que se consolidou sobre um relevo elevado e com solo mais competente às solicitações de sobrecarga devido as edificações. No entanto, a cidade apresenta novos vetores de crescimento urbano que atravessam as áreas de ocorrência de solos orgânicos, somado ao fato de que em in loco já foram identificados processos erosivos contínuos, o que pode causar problemas futuros se uma ocupação urbana for realizada nesses locais sem as devidas intervenções de proteção ambiental.

2. ÁREA DE ESTUDO

O município de São Tiago situa-se na mesorregião do Campo das Vertentes, e está distante a aproximadamente 200 quilômetros de Belo Horizonte (MG) (Figura 1).

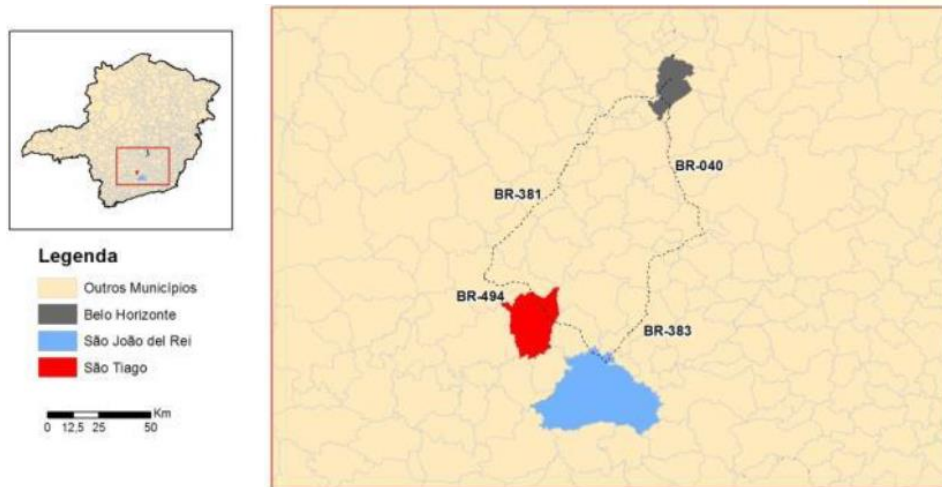


Figura 1 - Vias de acesso entre Belo Horizonte e São Tiago (CPRM, 2017).

A área urbana do município se encontra sobre uma única unidade geológica, caracterizada pela presença de ortognaisses, granitos e granodioritos compostos de biotita (CODEMIG, 2014) (CARNEIRO et al., 2014). Sua formação é datada geologicamente no período Riáciano (PP2), abrangido pelo super-éon Pré-Cambriano, o que é caracterizado por serem terrenos muito antigos, com intensa intemperização, abrangidos no domínio morfoclimático Mares de Morros (AB-SÁBER, 2003).

A pedologia levantada por Baruqui et al. (2006) indica a presença de latossolos vermelho-amarelos ácricos e cambissolos háplicos Tb distróficos na região. O latossolo tipo é caracterizado como solos com horizonte B profundo e bem desenvolvido, com textura argilosa a muito argilosa e coloração vermelho-amarelada. O cambissolo é definido como um tipo de solo mais jovem com horizonte B incipiente (Bi), textura média a muito argilosa, com grande proporção de cascalhos e comportamento muito influenciado pelos materiais que o originou.

A área é abrangida pelo Comitê da Bacia Vertentes do Rio Grande - GD2 (ANA, 2014) possui relevo entrecortado por pequenos córregos, alguns destes em avançado processo de eutrofização. Em termos climáticos, o município apresenta clima tropical de altitude, caracterizado por períodos bem definidos de chuvas, que iniciam em outubro e terminam em abril, e temperaturas mais amenas entre os climas tropicais, em razão das altitudes superiores a 800 metros. Além disso, seu bioma original é a mata atlântica, atualmente desmatada em grande escala, dando lugar a paisagens dominadas por pastagens e monoculturas na região.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de elaboração para o estudo é apresentada graficamente na Figura 2, a Unidade Morfodinâmica na Figura 3 e é descrita nos subitens seguintes (3.1. a 3.8.).

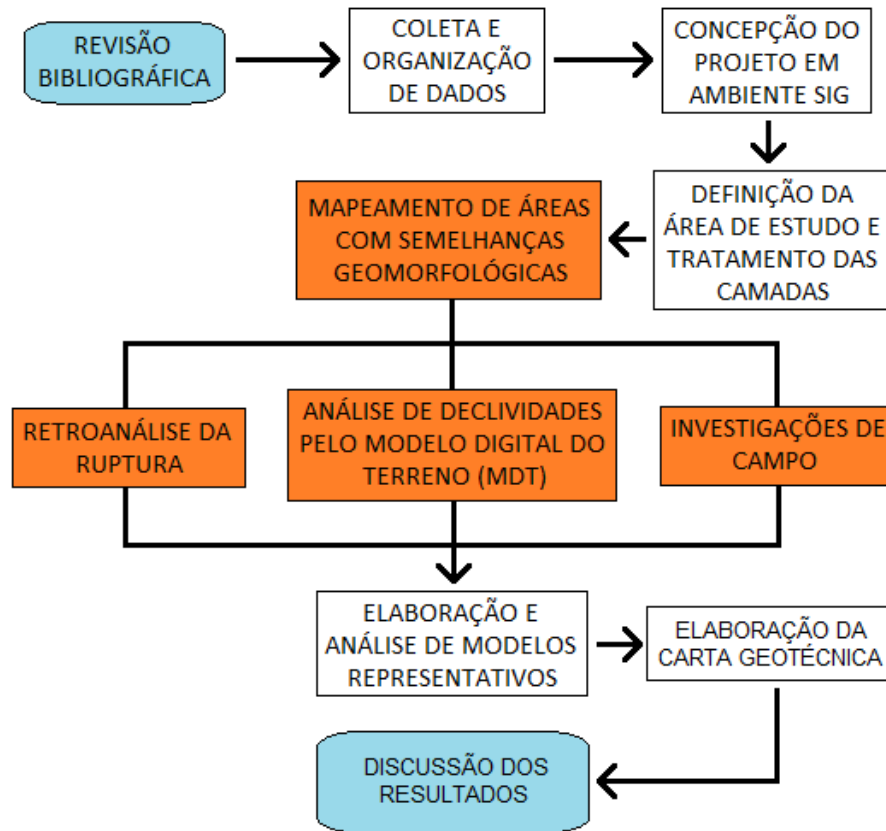


Figura 2 - Fluxograma de metodologia.

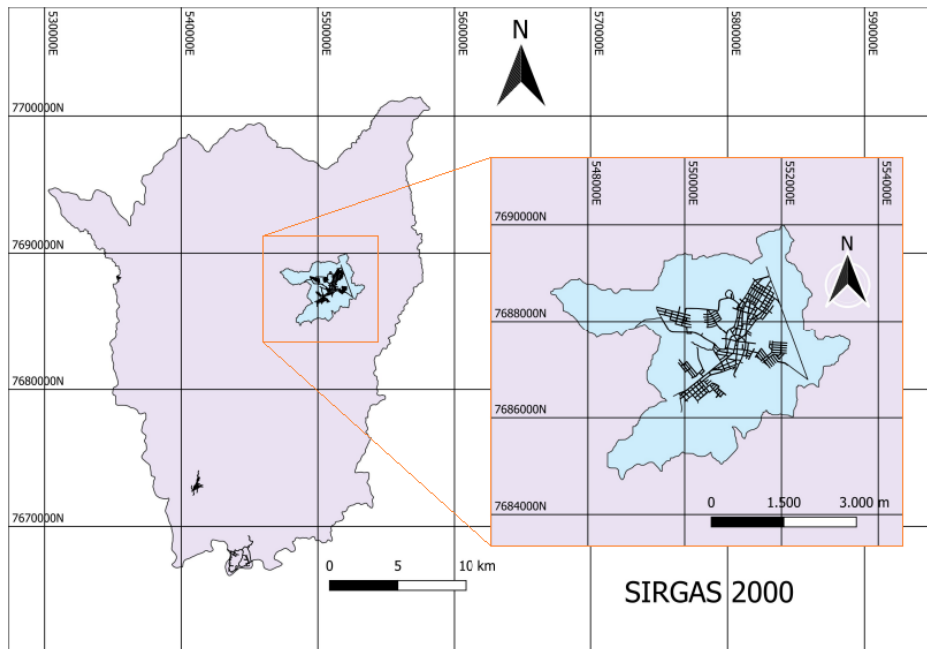


Figura 3. Unidade Morfodinâmica de Interesse de Projeto – São Tiago (MG). Área delimitada a partir das ottobacias do núcleo urbano (ANA, 2014). Limite municipal e faces de logradouros obtidos do banco de malhas territoriais do IBGE (2020-2021). Mapa dos autores (2022).

Com a UMIP definida, foi possível o recorte das camadas importadas para o projeto (exceto Google Satellite), com a finalidade de tratar as informações para os limites de abrangência da UMIP (Figura 4).

Dois destes processos foram a extração das curvas de nível em vetores e a obtenção das faixas de declividades de interesse do estudo a partir do MDT. Além disso, o cruzamento entre

a litoestratigrafia e a pedologia da UMIP forma utilizadas para caracterizar o modelo geotécnico da região, a partir do qual pode-se adotar critérios para a definição de unidades geotécnicas quando associado com os aspectos topográficos do MDT.

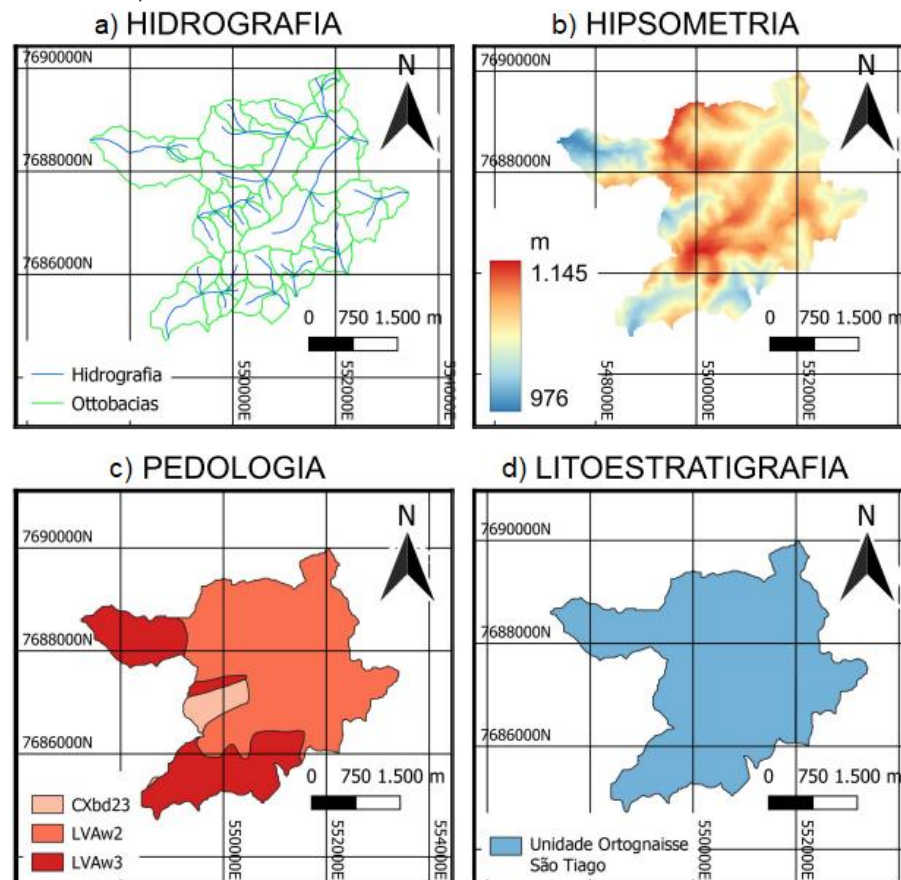


Figura 4. Camadas tratadas para a UMIP: (a) Hidrografia (ANA, 2014); (b) Hipsometria (USGS, 2014); (c) Pedologia (BARUQUI et al., 2006); (d) Litoestratigrafia (CARNEIRO et al., 2007). Coordenadas SIRGAS 2000. Adaptado (2022).

3.5. Mapeamento de áreas com semelhanças geomorfológicas

Com a UMIP estabelecida e as camadas de dados tratadas para sua abrangência, foi realizado o mapeamento das áreas que compartilham semelhanças de feições de relevo, tipos de solo e de geologia. Para tanto, a análise dos dados de pedologia e geologia em

sobreposição permitiram a identificação de áreas em que a presença de solos e seus substratos semelhantes, especialmente distribuídas, indicaram comportamentos geológico-geotécnicos semelhantes (conforme já observado por DIAS, 1995). No entanto, a identificação de registros de movimentos gravitacionais para a concepção de um modelo de retroanálise da ruptura ocorrida e a observação de solos em cortes de terreno e de

sinais de processos erosivos locais, permitiram a execução de um refinamento na delimitação dessas áreas com comportamento semelhante, denominadas Unidades Geotécnicas (DIAS, 1995).

3.5.1. Retroanálise da Ruptura

A retroanálise de uma ruptura possui como objetivo a identificação dos condicionantes ambientais que podem ter contribuído para que o movimento do terreno ocorresse, tanto permanentes (tipo de solo presente, drenagem superficial) quanto específicos ao intervalo de tempo definido anterior ao evento (pluviometria, profundidade do lençol freático, etc.). A geometria do modelo foi criada inicialmente no AutoCAD® a partir das curvas de nível no local, obtidas pela ferramenta de extração de contornos do QGis® pela análise do MDT (USGS, 2014), sendo realizados ajustes na superfície de forma a aproximá-lo ao aspecto anterior ao escorregamento. Com a geometria definida, foi realizada a importação da seção para o programa de análise de estabilidade de taludes Slide2®, onde são atribuídos os parâmetros de resistência e condições de contorno para a análise de estabilidade do modelo. Os materiais do modelo e seus parâmetros de resistência foram obtidos de resultados de ensaios de cisalhamento direto (ASTM D3080-04) apresentados na literatura (ROCHA et al., 2002) (BERNARDES, 2003) e de ensaios de investigação de campo realizados em campanha geotécnica pós-evento de ruptura (OLIVEIRA, 2017).

No presente estudo a profundidade dos horizontes de contato entre os materiais foi calibrada iterativamente, em razão da inexistência da sondagens pré-evento. O modelo de ruptura foi analisado Slide2®, em modo de busca por cunhas de ruptura não-circulares com o algoritmo Cuckoo Search, utilizando métodos determinísticos de cálculo de fatores de segurança por equilíbrio limite

(Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price). Os resultados obtidos são comparados aos preconizados para nível de segurança de taludes pela ABNT NBR 11.682/91 (Tabela 1).

Tabela 1. Fatores de segurança mínimos para estabilidade de taludes (ABNT NBR 11.682/91).

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra perdas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

7

Validadas as condições da ruptura, pesquisou-se na UMIP outras áreas com semelhanças de relevo, pedologia, geologia e outros aspectos ao local da ocorrência, cujas características definem unidades geotécnicas pelos condicionantes geomorfológicos comuns ao tipo de ruptura ocorrido.

3.5.2. Análise de Declividades do MDT

Utilizando a ferramenta do QGis® para análise de declividades do MDT, foi possível obter uma imagem georreferenciada da UMIP com as classes de declividades (em graus ou em percentual). Especificamente neste estudo, os intervalos adotados para obtenção das classes de declividade tiveram como base a classificação apresentada por Bitar, Freitas e Ferreira (2012), consolidada a partir do conhecimento geotécnico acumulado para terrenos oriundos de formações pré-cambrianas, cujas faixas de declividade determinam ações de preparo (ou restrição) à ocupação:

- Até 17° (30%): onde a ocupação deve depender de medidas básicas usuais a adotar;
- Entre 17 e 25° (47%): onde a ocupação deve estar condicionada à realização de medidas resultantes de estudos detalhados;

- Entre 25 e 30° (58%): onde a ocupação deve ser condicionada a medidas especiais advindas de detalhamento ainda maior;
- Entre 30 e 45° (100%): onde a ocupação deve ser evitada, podendo ser admitida em casos excepcionais, mediante soluções fundamentadas em estudos adequados a obras para situações de perigo ou risco extremo;
- Acima de 45°: onde, além do impedimento legal, deve-se revisar eventuais ocupações existentes, em razão da complexidade inerente e de possíveis interações adicionais (com cabeceiras de drenagem, nascentes d'água, escarpas e outras)

Baseado neste estudo, no qual a UMIP está em intrínseco enquadramento, foi realizada a análise de declividades com o MDT nos intervalos de declividades recomendados expressos em percentuais, incluindo a divisão do intervalo até 30% em quatro faixas (0 – 5%; 5 – 10%; 10 – 20%; 20 – 30%) para melhor sensibilidade ao relevo.

3.5.3. Investigações de Campo

As investigações de campo foram realizadas durante dois dias, por meio de observações e registros de taludes em corte, aspectos de atividade erosiva e outras características topográficas, a fim de refinar e complementar dados sobre a UMIP. Os pontos fotografados tiveram suas coordenadas também registradas através do aplicativo UTM Geo Map®, com o mesmo SRC determinado para o projeto do QGis®, possibilitando a importação dos dados.

As investigações tiveram por finalidade a identificação de outros tipos de solos que eventualmente não tivessem sido mapeados na pedologia de média intensidade (escala 1:250.000) de Baruqui et al. (2006), assim como outros sinais de processos erosivos e/ou

escorregamentos locais. Os registros fotográficos foram obtidos a partir de taludes de corte em áreas em que se constatou a presença de material turfoso associado à água, características inerentes aos solos orgânicos. A identificação deste tipo de solo é muito importante, uma vez que ele é inapto ao assentamento de edificações, por ser um material de sedimentação recente, normalmente adensado, com baixa resistência e grande deformabilidade a solicitações mecânicas (ANTUNES e SALOMÃO, 2018).

Nos locais com dificuldades de acesso, os processos erosivos também foram ser identificados pelas imagens de satélite do Google Maps, desde que as imagens estejam atualizadas com as observações realizadas.

3.6. Elaboração e análise de modelos representativos

Para a avaliação dos tipos de solo dentro das faixas de declividades definidas, foram concebidos modelos representativos a partir do estabelecimento de uma seção de um talude fictício de dez metros de altura e inclinações dadas pelos limites dos intervalos preconizados por Bitar, Freitas e Ferreira (2012), bem como profundidades típicas para os solos analisados (EMBRAPA, 2021) (FONSECA et al., 2016 apud EMBRAPA, 2013). Além disso, em virtude da falta de informações de sondagens foram estabelecidas três condições para a ocorrência do lençol freático: i) sem lençol freático; ii) lençol freático no nível de jusante; iii) lençol freático em toda superfície do modelo.

Os parâmetros de resistência foram obtidos de ensaios que consolidaram seus valores na literatura (FONSECA et al., 2016) (PORTUGAL et al., 2008) (ROCHA et al., 2002) (BERNARDES, 2003). Além disso, foram definidos cinco cenários de variação destes parâmetros, a fim

de cobrir a variabilidade dos materiais e o efeito de encharcamento sobre o aumento do peso específico e redução dos parâmetros de resistência: a) sem variações; b) redução da coesão em 30%; c) redução do ângulo de atrito em 30%; d) aumento do peso específico em 30%; e) Todas as variações anteriores aplicadas simultaneamente. As seções de análise de estabilidade foram inseridas e executadas no programa Slide2®, com superfície de ruptura a ser obtida no mesmo modo de busca de cunhas de ruptura validada na retroanálise do escorregamento ocorrido. Os resultados foram tratados e comparados, a fim de se observar como os diferentes solos se comportam em termos de redução de fator de segurança conforme as faixas de declividade em que se localizam e a situação de saturação que sofrem durante o período chuvoso.

3.7. Elaboração da carta geotécnica

A partir do modelo geotécnico obtido por meio da combinação da pedologia e geologia locais, acrescentando as condições obtidas na retroanálise do escorregamento da rua Joaquim Marquês da Silva, o refinamento dos dados de pedologia e observações acerca de movimentos de massa e processos erosivos com as investigações de campo, somado aos resultados obtidos nas análises dos modelos representativos, permitiu a definição das unidades geotécnicas (DIAS, 1995) (ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004) (SOUZA; SOBREIRA, 2015) e as classes de suscetibilidade a movimentos de massa, conforme os aspectos específicos da UMIP. As camadas foram criadas e categorizadas dentro do projeto no QGis®, e lançadas em layout de carta geotécnica com o intuito de servir como orientação da gestão local na expansão urbana do município.

3.8. Discussão dos resultados

O resultado do mapeamento foi discutido e comparado a trabalhos anteriores, a fim de mostrar as potencialidades dos métodos utilizados para a elaboração de cartas geotécnicas, sobretudo para municípios pequenos, cujo orçamento muitas vezes é insuficiente para um estudo detalhado de todo seu território.

4. RESULTADOS

4.1. Mapeamento de áreas com semelhanças geomorfológicas

4.1.1. Retroanálise da Ruptura ocorrida na Rua Joaquim Marquês da Silva

A Figura 5(a) apresenta a indicação em planta do local onde ocorreu o movimento gravitacional do terreno no município.

O modelo de ruptura da rua Joaquim Marquês da Silva foi elaborado a partir das curvas de nível da área, obtidas pela ferramenta de extração de contornos do MDT do QGis®, e foram feitas as edições necessárias para aproximar a superfície à condição anterior à ruptura, em que havia um aterro sobre o qual a rua e as casas estavam assentes. As camadas de curvas de nível e dos logradouros foram exportadas em formato .dxf, que é compatível com o programa AutoCAD®. No programa, foi possível traçar a seção para a extração do modelo (Figura 5(b)).

Os parâmetros físicos dos materiais foram obtidos a partir de resultados fornecidos na literatura e dos resultados para o ensaio de cisalhamento direto (ASTM D3080-04) realizado com amostras do solo local, apresentados na Tabela 2.

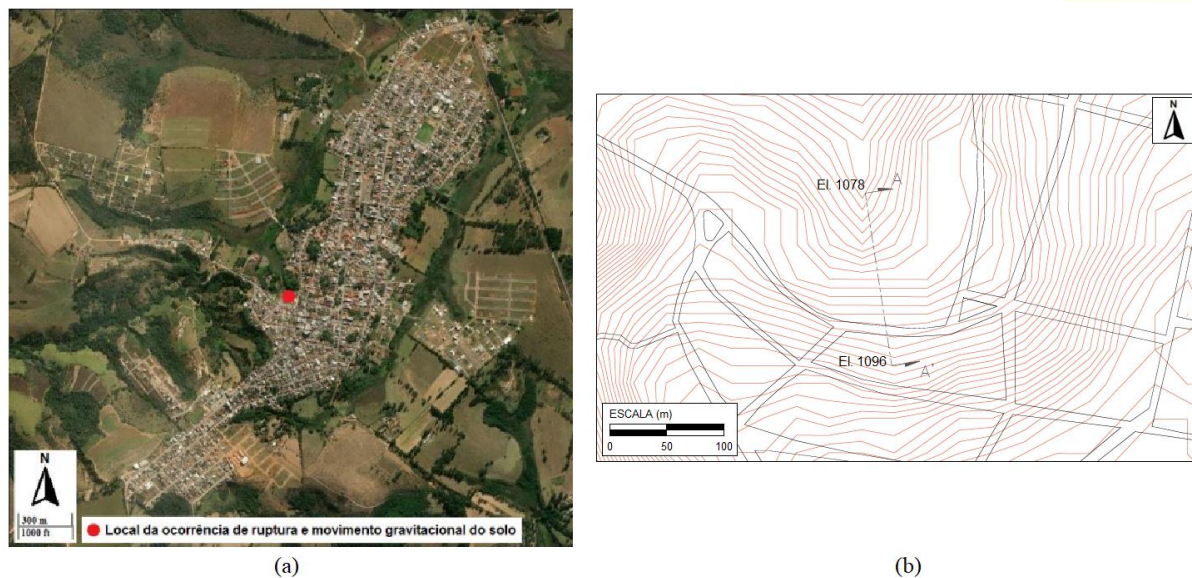


Figura 5 - Local do escorregamento e a seção utilizada para a retroanálise do evento: (a) Registro de satélite do município de São Tiago com a sinalização do local onde ocorreu o movimento gravitacional do terreno (Google Maps, 2022 – adaptado); (b) Seção para elaboração do modelo de retroanálise.

Tabela 2. - Parâmetros físicos dos materiais adotados na retroanálise.

Materiais	Coesão (kPa)	Φ (°)	γ (kN/m ³)	Autor(es)
Solo orgânico (Colúvio)	20,00	24,00	13,01	Oliveira (2017)
LVA	40,68	11,30	12,85	Rocha et al. (2002)
Ortognaise	21,90	31,70	29,00	Bernardes (2003)

Além disso, por se tratar de uma área de concentração de drenagens e do período chuvoso durante a ocorrência, estabeleceu-se a posição do lençol freático como coincidente a toda superfície do modelo. Por fim, carregamentos de 15 kN/m² foram aplicados nas áreas com residências, de acordo com o peso específico do concreto armado, alvenarias e sobrecargas de uso preconizadas pela NBR ABNT 6120/80. A Figura 6 apresenta o resultado da análise de estabilidade.

Os fatores de segurança obtidos para o modelo estão acima de 1,00 pelos três métodos de análise de estabilidade de forma determinística,

o que corrobora para uma condição estável. Entretanto, esses valores estão muito próximos à condição limite, e categorizam o local em um nível de segurança baixo, de acordo com o que é preconizado pela norma ABNT NBR 11.682/91 (Tabela 2).

Quanto ao tipo de cunha obtida pela análise, observa-se que ela se formou sobre o talude à jusante dos carregamentos, representados pelas casas existentes anteriormente. De acordo com as pessoas que presenciaram o momento da ruptura, o escorregamento do terreno começou na área atrás dos muros de fundo do quintal destas residências, avançando até paralisar no meio do logradouro. Dito isso, pode-se definir a atividade de escorregamento que ocorreu na rua Joaquim Marquês da Silva, conforme a classificação elaborada por Cruden e Varnes (1996), como de estilo único, com classe de velocidade 5 (rápido), teor de umidade muito alto e com distribuição retrogressiva, por ter se iniciado em um local do terreno e ter avançado

oposta à direção de transporte dos solos mobilizados.

Dada a particularidade do local estar em uma área de concentração de drenagens e com lençol freático muito próximo a superfície, associados com os resultados obtidos para a retroanálise, é sugestivo que o material do terreno tenha sofrido redução de coesão pela saturação, e conseqüentemente houve o arranque de partículas pela infiltração e percolação das águas no terreno, conforme

constatado com a presença de manilhas de drenagem rompidas no local e a cor escurificada do solo sobre o logradouro (Figura 7), indicando que a mistura com o solo orgânico existente no pé do talude.

Portanto, pode-se definir um tipo de unidade geotécnica a partir da ocorrência das cabeceiras de drenagem, onde ocorrem as maiores vazões de águas servidas, associadas à proximidade com a presença de solos orgânicos.

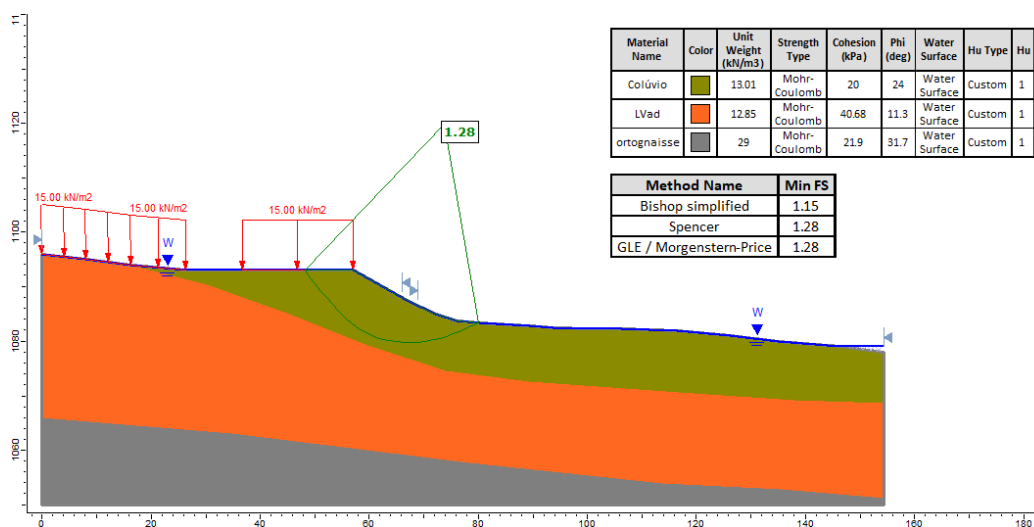


Figura 6 - Resultados obtidos para o modelo de retroanálise.



Figura 7. Escombros com manilhas de concreto rompidas e solo escuro sobre logradouro (CPRM, 2017).

4.1.2. Declividades de Superfície

A Figura 8 mostra o resultado da análise de declividades do MDT dentro da UMIP, associada aos intervalos recomendados por Bitar, Freitas e Ferreira (2012) e à divisão da faixa até 30% em quatro intervalos (0 – 5%; 5 – 10%; 10 – 20%; 20 – 30%).

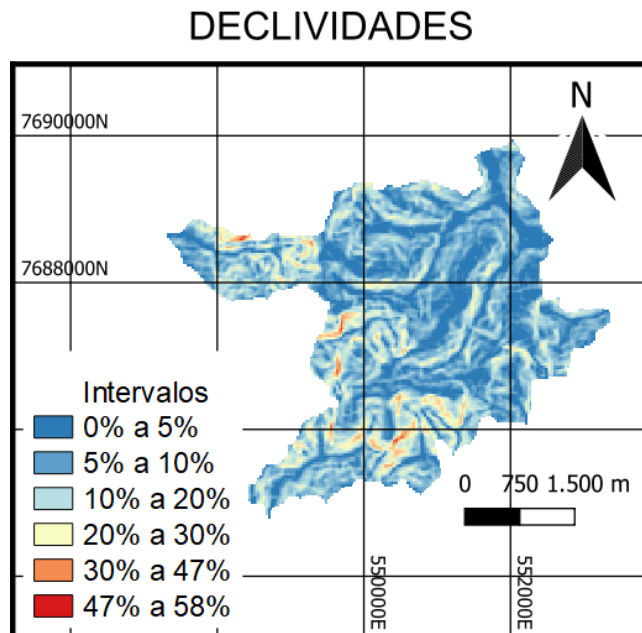


Figura 8 - Declividades na UMIP, análise de declividades do MDT no QGIS®. Coordenadas SIRGAS 2000. Mapa dos autores (2022).

Ao comparar o arquivo raster de declividades com o raster de elevações (Figura 4-b), é possível observar que algumas áreas com declividades até 10% marcam os fundos de vale da região. Essa observação, associada a uma inclinação de superfície tão baixa, indica a presença de solos transportados, e que podem também estar associados com a presença de contaminação orgânica. Esses solos não estão indicados no mapeamento de reconhecimento de solos de Baruqui et al. (2006), e, portanto, foi necessária a verificação em visita de campo da presença desses solos e de outros que porventura não tivessem sido contemplados no estudo.

É importante ressaltar, assim como feito por Bitar, Freitas e Ferreira (2012), que a declividade

não pode ser fator exclusivo de decisão sobre a ocupação, “dado que há situações onde a influência de outros fatores do meio físico pode ser até mais importante do que a inclinação do terreno”. Com essa situação e outras que possam ser constatadas dentro da UMIP em mente, pode-se definir unidades geotécnicas a partir das manchas de declividade geradas, em distinção para os tipos de solo presentes, ao combinar as feições do terreno com o modelo geotécnico obtido da sobreposição entre pedologia e estratigrafia (Figuras 4-c e 4-d).

4.1.3. Investigações de Campo

Durante as investigações de campo foi possível identificar os registros do mapeamento dos latossolos vermelho-amarelos (LVA) e dos cambissolos háplicos Tb distróficos (CXbd) realizados por Baruqui et al. (2006). Além disso, confirmou-se a presença de solos turfosos (ST) nos pontos situados nos vales da UMIP, assim como afloramentos do lençol freático nesses locais, ao que a presença desses solos é associada. Observa-se o acompanhamento dos registros de solos turfosos ao longo das áreas supracitadas (Figura 9), indicando que tais feições podem ser categorizadas como unidades geotécnicas. A Figura 10 apresenta um exemplo para cada um dos solos identificados.

Quanto a identificação de processos erosivos intensos, as imagens de satélite do Google Maps indicam as seguintes áreas apresentadas na Figura 11, localizadas a sudoeste da área urbana do município.

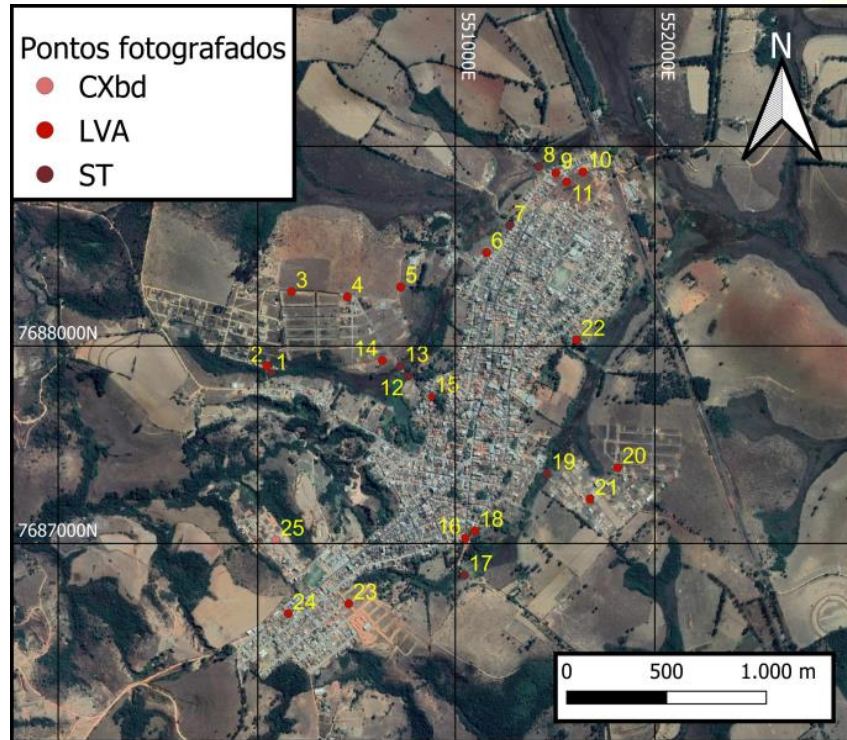


Figura 9 - Registros dos tipos de solo com o uso do aplicativo UTM Geo Map®. Após a atividade, os pontos são importados para o projeto. Imagens do Google Satellite (2022). Coordenadas SIRGAS 2000. Mapa dos autores (2022).

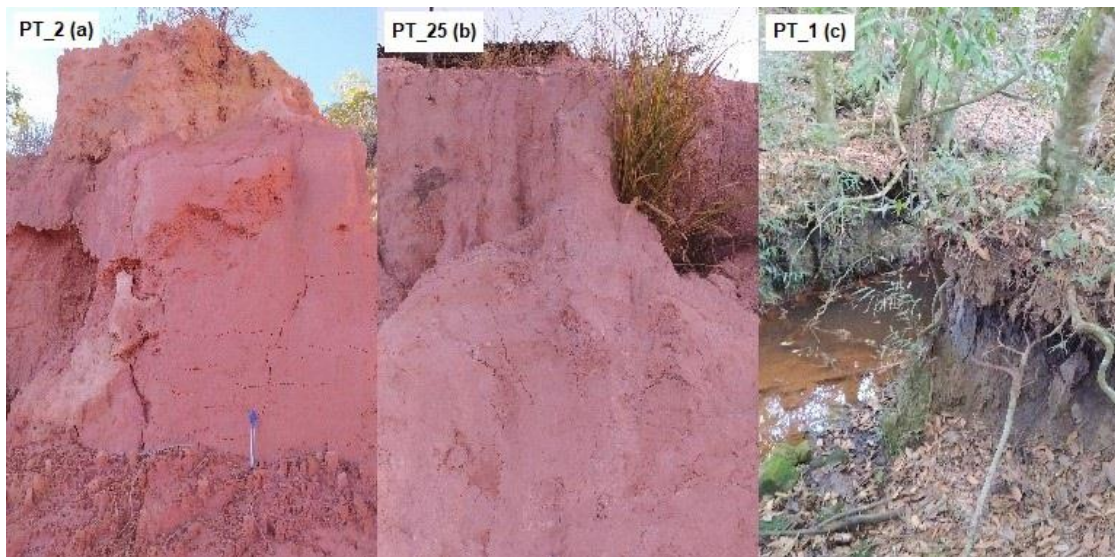


Figura 10 - Exemplos para as três classes de solos encontrados na UMIP: (a) Latossolo vermelho-amarelo (Ponto 2); (b) Cambissolo háplico Tb distrófico (Ponto 25); (c) Solos orgânicos (Ponto 1). Autores (2022).

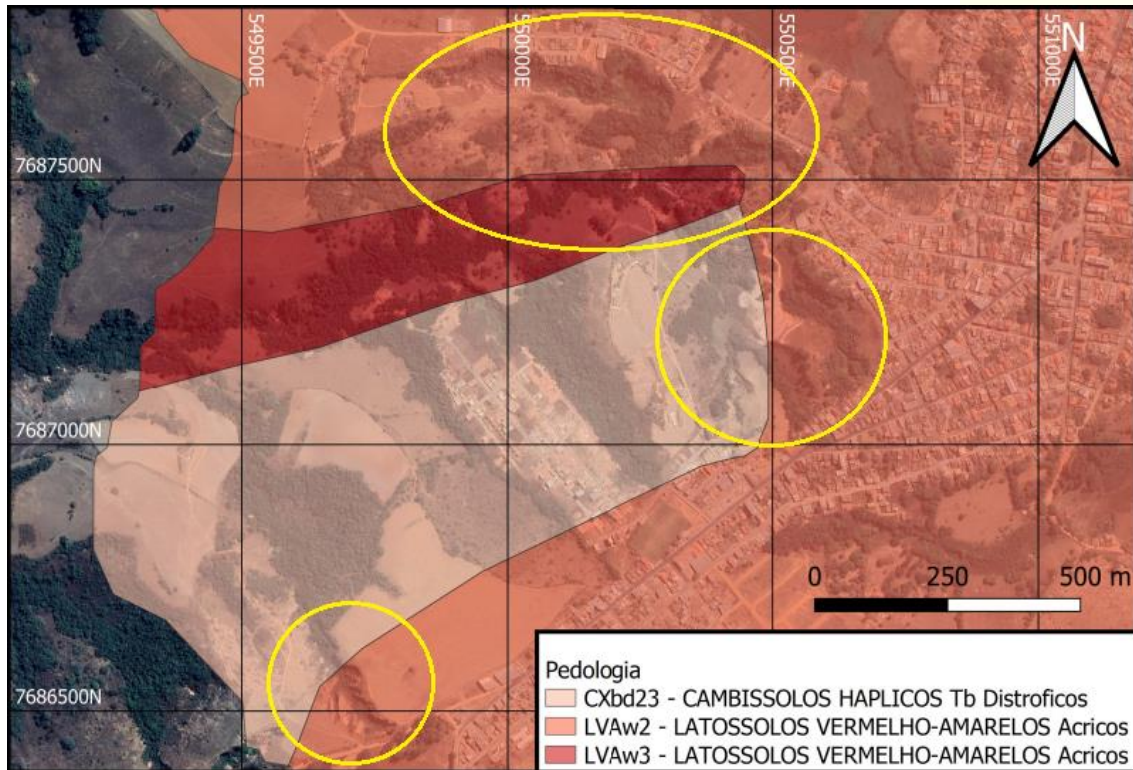


Figura 11 - Indicações de locais com processos erosivos intensos dentro da UMIP. Pedologia de média intensidade de Baruqui et al. (2006) e imagens de satélite do Google Satellite (2022). Coordenadas SIRGAS 2000. Adaptado.

Ao comparar a localização dessas áreas com o mapeamento de média intensidade de solos feito por Baruqui et al. (2006), constatou-se que esses processos estão ocorrendo na transição, ou próximos dela, entre as áreas de cambissolos háplicos Tb distróficos e de latossolos vermelho-amarelos. As áreas de entorno a esses locais podem ser delimitadas como unidades geotécnicas, uma vez que se considera que essas erosões possuem predisposição a se expandirem continuamente, ou de forma brusca, por algum agente ativador de movimentos de massa.

4.2. Modelos representativos para áreas com declividades

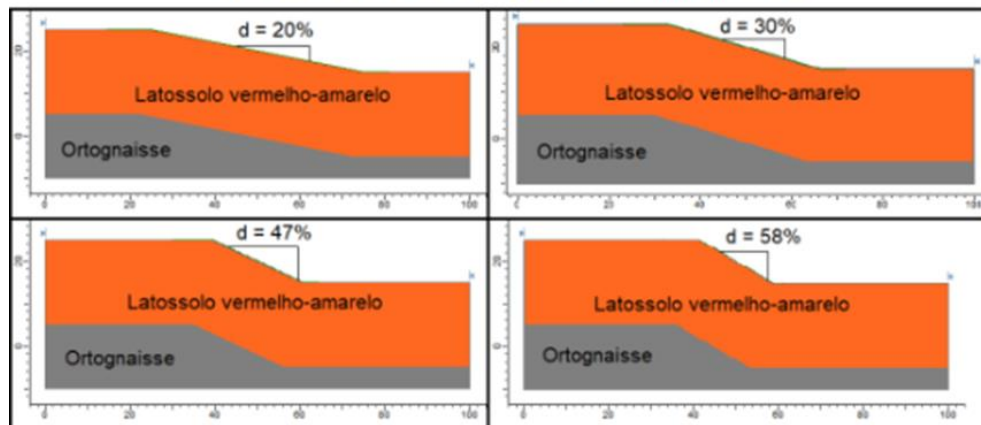
Para a percepção da suscetibilidade a movimentos de massa nas áreas de declividade da UMIP, elaborou-se modelos representativos em cenários padrão. Essa forma de avaliação se mostrou a mais viável para a análise das

unidades geotécnicas definidas por pedologia e declividade, uma vez que não há um banco de dados que caracterizem os horizontes e profundidades dos solos em toda a UMIP.

Os modelos foram elaborados com um talude fictício de dez metros de altura e inclinações dadas pelos limites dos intervalos preconizados por Bitar, Freitas e Ferreira (2012). Admite-se uma profundidade de latossolo vermelho-amarelo de quinze metros, horizonte único e uniforme (EMBRAPA, 2021). Quanto ao cambissolo háplico Tb distrófico, admite-se uma profundidade total de dez metros, cuja espessura adotada para o horizonte B foi de meio metro (FONSECA et al., 2016 apud EMBRAPA, 2013). A Figura 12 apresenta a geometria dos modelos.

Os parâmetros físicos utilizados da literatura para os materiais supracitados são apresentados na Tabela 3.

a) LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS



b) CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb DISTRÓFICOS

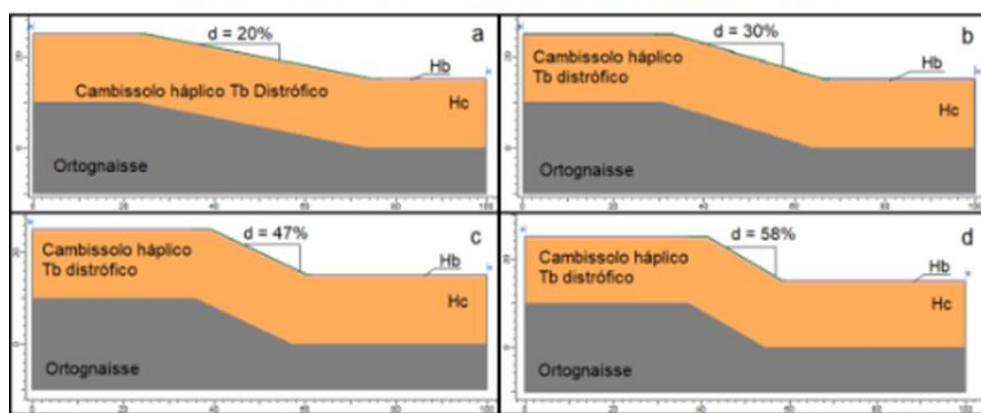


Figura 12 - Modelos representativos para quatro faixas de declividade (0-20%; 20-30%; 30-47%; 47-58%). a) Latossolo Vermelho-Amarelo; b) Cambissolo Háplico Tb Distrófico. Autores (2022).

Tabela 3 - Parâmetros físicos dos materiais adotados nos modelos representativos.

Materiais	Coesão (kPa)	Φ (°) Ângulo de atrito	γ (kN/m ³) Peso específico	Autor(es)
LVA	40,68	11,30	12,85	Rocha et al. (2002)
HB Não-inundado	20,00	29,00	14,32	Fonseca et al. (2016) e Portugal et al. (2008)
HC Não-inundado	30,00	29,00	12,75	
HB inundado	4,00	33,00	14,32	Bernardes (2003)
HC inundado	1,00	29,00	12,75	
Ortognaisse	21,90	31,70	29,00	

Analisando somente os fatores de segurança obtidos pelo método de Bishop Simplificado

(Tabela 4), os resultados para os latossolos vermelho-amarelos mostram que, ao dividir os valores dos modelos inundados pelos valores dos modelos sem lençol freático, a maior redução é observada nos cenários com redução de 30% na coesão. Além disso, observa-se que essa redução é atenuada com o aumento da declividade, explicitando que a coesão responde a uma proporção cada vez maior da resistência do terreno a medida em que sua inclinação se eleva. Por outro lado, para os cambissolos háplicos Tb distróficos, observa-se que a maior redução ao inundar os modelos ocorre nos cenários com redução de 30% do ângulo de atrito. Além disso, essa redução é agravada nas maiores declividades, posto que este tipo de

solo, quando inundado, sofre perda acentuada de sua coesão aparente, e o ângulo de atrito não responde eficientemente à mobilização de

resistência do terreno com o acréscimo de declividade.

Tabela 4 - Taxas de redução dos fatores de segurança devido ao aumento do teor de umidade e saturação nos modelos representativos.

Cenários	Nível de água (NA)	Latosolos vermelho-amarelos				Cambissolos háplicos Tb distróficos			
		20%	30%	47%	58%	20%	30%	47%	58%
Parâmetros sem variação	Sem NA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	NA jusante	22,509	20,503	16,496	13,967	58,083	55,750	51,759	49,604
	NA montante	34,374	32,886	29,646	27,724	85,512	87,707	91,019	93,086
Coesão reduzida em 30%	Sem NA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	NA jusante	26,774	23,291	17,594	14,539	55,135	51,952	47,159	44,721
	NA montante	40,795	38,251	34,095	32,028	84,459	86,778	90,626	93,070
Ângulo de atrito reduzido em 30%	Sem NA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	NA jusante	18,158	17,042	14,649	13,092	61,328	59,958	57,014	55,252
	NA montante	27,729	26,901	25,044	23,677	86,742	88,748	91,538	93,135
Peso específico acrescido em 30%	Sem NA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	NA jusante	19,412	16,562	11,663	9,425	45,904	43,275	39,805	37,993
	NA montante	30,000	27,826	24,262	22,782	73,816	77,220	81,837	84,576
Todos os parâmetros com variações	Sem NA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	NA jusante	19,306	16,432	11,662	9,524	46,429	43,936	40,510	38,673
	NA montante	29,850	27,631	24,196	22,583	74,100	77,504	82,143	84,725
Maior redução		40,795	38,251	34,095	32,028	86,742	88,748	91,538	93,135

Tais observações sinalizam para a maior fragilidade dos cambissolos háplicos Tb distróficos à erosão pluvial em relação aos latossolos vermelho-amarelos. Além disso, em declividades elevadas os taludes predominantemente Latossolos são mais susceptíveis a sofrer escorregamentos. Dessa forma, constata-se a maior suscetibilidade a movimentos de massa dos cambissolos háplicos Tb distróficos em relação aos latossolos vermelho-amarelos em mesmas faixas de declividades.

4.3. Elaboração da carta geotécnica

4.3.1. Definição das Unidades Geotécnicas

Ao combinar o modelo geotécnico com as feições do MDT para a UMIP, associado as demais análises realizadas, obte-se obter os contornos de polígonos para as seguintes unidades geotécnicas:

- (1) Latossolos vermelho-amarelos em declividades até 20%;
- (2) Latossolos vermelho-amarelos em declividades entre 20% e 30%;
- (3) Latossolos vermelho-amarelos em declividades entre 30% e 47%;
- (4) Latossolos vermelho-amarelos em declividades entre 47% e 58%;

- (5) Cambissolos háplicos Tb distróficos em declividades até 20%;
- (6) Cambissolos háplicos Tb distróficos em declividades entre 20% e 30%;
- (7) Cambissolos háplicos Tb distróficos em declividades entre 30% e 47%;
- (8) Cambissolos háplicos Tb distróficos em declividades entre 47% e 58%;
- (9) Áreas com predominância de solos orgânicos saturados ou com nível d'água próximo à superfície;
- (10) Áreas de concentração da drenagem natural próximas a locais com presença de solos orgânicos;

- (11) Áreas próximas a locais com processos erosivos intensos, em transições entre cambissolos e latossolos.

A partir dessas definições para as unidades geotécnicas, foram desenhadas as linhas que as delimitam em uma nova camada dentro do projeto no QGis®. Em seguida, foi realizado o processamento de conversão da geometria de linhas para polígonos, possibilitando a edição dos atributos de cada região e sua categorização de forma agrupada. Feito isso, obteve-se a carta síntese apresentada na Figura 13 a seguir.

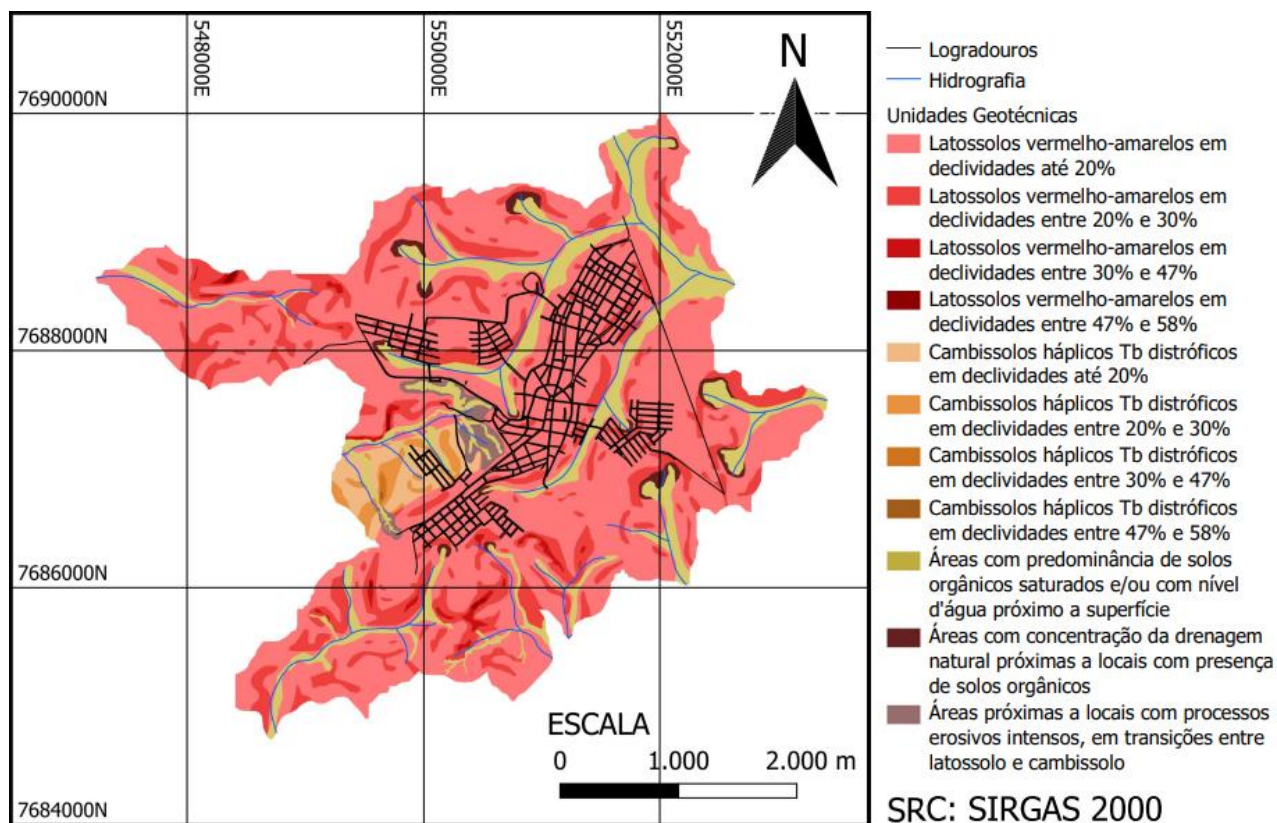


Figura 13 - Carta síntese com unidades geotécnicas para a UMIP – São Tiago. Mapa dos autores (2022).

4.3.2. Classes de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais

As classes de susceptibilidade a movimentos gravitacionais na UMIP foram determinadas a partir do cruzamento entre as unidades geotécnicas definidas, os resultados da retroanálise e as análises dos modelos representativos, que demonstraram a maior fragilidade dos cambissolos a processos erosivos e a influência das declividades verificada dentro dos intervalos de classificação estabelecidos por Bitar, Freitas e Ferreira (2012). Além disso, os refinamentos obtidos nas investigações de campo, a presença de solos orgânicos em torno da mancha urbana do município, a pedologia de média intensidade (BARUQUI et al., 2006) e as feições de relevo dentro da UMIP somam-se aos critérios utilizados para propor uma classificação em cinco faixas de suscetibilidade para as unidades geotécnicas a seguir:

- Muito baixa: áreas em que cujas características do solo presente, a topografia local e de entorno e a interação observada nesses aspectos entre si e com outros como a rocha ou horizonte de substrato, ações antrópicas e agentes erosivos não costumam apresentar problemas quanto a movimentos de terreno;
- Baixa: áreas que são estáveis, mas que apresentam algum aspecto que pode contribuir para o desencadeamento de processos erosivos, como solos pouco desenvolvidos em declividades toleráveis, porém suficientes para o arranque de sedimentos pela ação pluvial se expostos;
- Moderada: áreas que estejam em faixas de declividades cuja ocupação deve ser balizada por estudos sobre o solo de fundação e a influência do entorno, ou que estejam próximas a regiões de concentração da bacia de

contribuição, com presença de solos transportados e contaminações orgânicas;

- Alta: áreas cujas declividades, e a depender do tipo de solo, são aspectos de grande relação com processos erosivos presentes no local, não sendo recomendada a sua ocupação que não seja baseada por estudos aprofundados com soluções adequadas de fundações e contenções;
- Muito alta: áreas em que já se verificam erosões com atividade intensa e marcas de escorregamentos recentes, solos orgânicos e/ou com lençol freático muito próximo a superfície, com afloramentos, e regiões de maior declividade da área de estudo associada a solos pouco desenvolvidos.

Baseado nessas classes de suscetibilidades, são apresentadas a associação delas com as unidades geotécnicas definidas na Tabela 5.

Ao realizar a associação das unidades geotécnicas com as classes de suscetibilidade supracitadas no projeto, foi obtida a carta de suscetibilidade para a UMIP, apresentada na Figura 14.

A análise das áreas obtidas no QGis® da nova camada informa os seguintes percentuais da área da UMIP (2.055,55 ha) por classe de suscetibilidade:

- Muito baixa: 72,91% (1.498,60 ha);
- Baixa: 13,99% (247,48 ha);
- Moderada: 2,32% (47,73 ha);
- Alta: 0,14% (2,85 ha);
- Muito alta: 10,65% (218,88 ha).

A comparação entre a carta de suscetibilidade e o local onde ocorreu o movimento do terreno mostra a associação entre as cabeceiras de drenagem e as áreas com presença de solos orgânicos, confirmada nas investigações de

campo. Essa associação é pertinente, uma vez que os solos transportados e os detritos orgânicos da área (galhos de árvores, folhas e restos e matéria orgânica) são encaminhados pela drenagem a estes locais, sendo depositados ao longo dos fundos dos vales por disposição hidráulica.

Para cada uma das classes de suscetibilidade, são apresentadas as seguintes recomendações:

- **Muito baixa:** áreas que não demandam infraestruturas para estabilização, salvo em caso de detecção de alguma anomalia geotécnica localizada.
- **Baixa:** áreas estáveis, mas que devem receber atenção quanto a drenagem e caminhos preferenciais das águas servidas, devendo realizar intervenções se apresentar indícios de processos erosivos.
- **Moderada:** deve-se atentar ao estado das ocupações presentes, se há imóveis com sinais de recalque diferencial nas fundações e/ou trincas nas paredes, ou solo constantemente úmido e sinais de capilaridade nas paredes, recomendando-se estudos detalhados sobre os subsolos e a execução de projetos para contenção e estabilização do local.
- **Alta:** verificação do estado de imóveis presentes, em especial às fundações, recuperação de cobertura vegetal onde se constatar solos expostos para atenuação de processos erosivos e zoneamento da área a fim de evitar verticalização excessiva.
- **Muito alta:** restrição total à ocupação, zoneamento como área de preservação ambiental permanente, verificação de eventuais ocupações presentes e realização de estudos para execução de obras de estabilização geotécnica e inativação dos agentes provocadores dos processos erosivos.

Tabela 5 - Unidades geotécnicas associadas às classes de suscetibilidade.

Unidades Geotécnicas	Classe de suscetibilidade
(1) Latossolos vermelho-amarelos em declividades até 20%	Muito baixa
(2) Latossolos vermelho-amarelos em declividades entre 20% e 30%	Baixa
(3) Latossolos vermelho-amarelos em declividades entre 30% e 47%	Moderada
(4) Latossolos vermelho-amarelos em declividades entre 47% e 58%	Alta
(5) Cambissolos háplicos Tb distróficos latossólicos em declividades até 20%	Baixa
(6) Cambissolos háplicos Tb distróficos latossólicos em declividades entre 20% e 30%	Moderada
(7) Cambissolos háplicos Tb distróficos latossólicos em declividades entre 30% e 47%	Alta
(8) Cambissolos háplicos Tb distróficos latossólicos em declividades entre 47% e 58%	Muito alta
(9) Áreas com predominância de solos orgânicos saturados ou com nível d'água próximo à superfície	Muito alta
(10) Áreas de concentração da drenagem natural próximas a locais com presença de solos orgânicos	Moderada
(11) Áreas próximas a locais com processos erosivos intensos, em transições entre cambissolos e latossolos	Muito alta

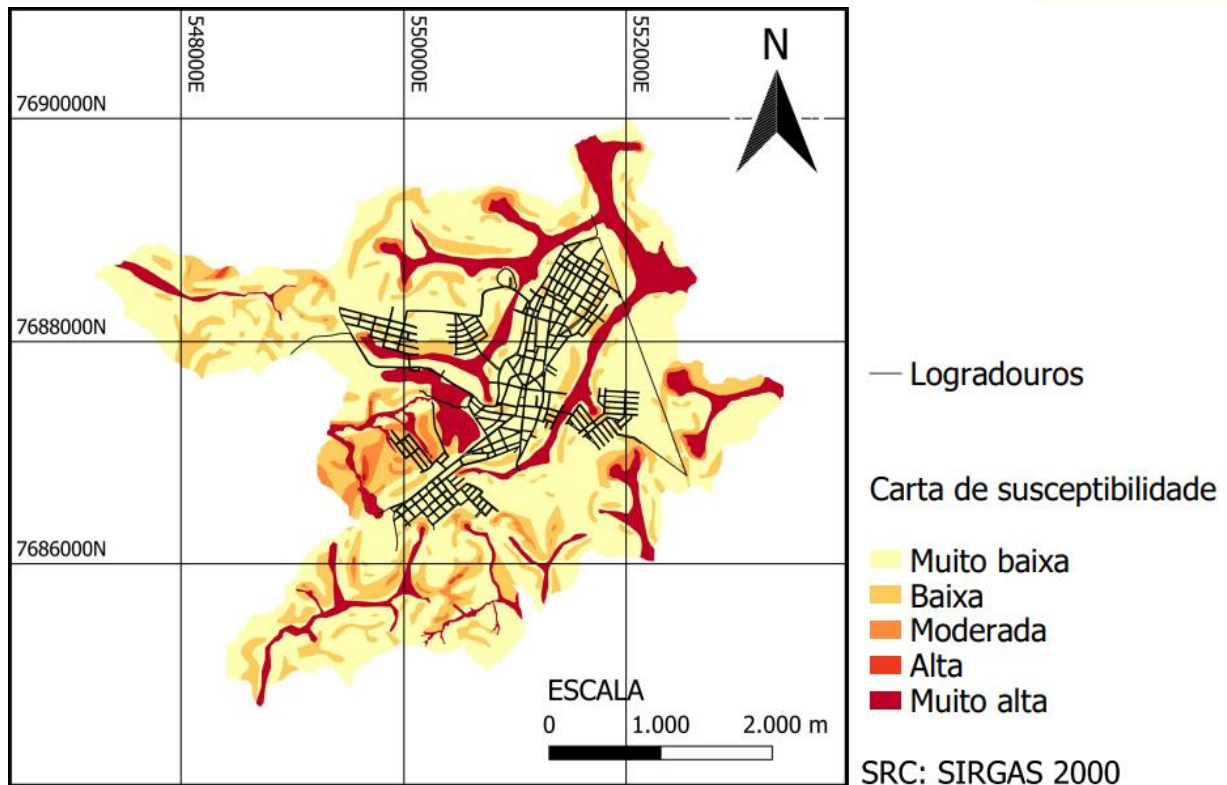


Figura 14 - Carta de susceptibilidade para a UMIP – São Tiago. Mapa dos autores (2022).

5. DISCUSSÃO

As metodologias exploradas para a elaboração da carta geotécnica de susceptibilidade a movimentos de massa acumulam os conhecimentos consolidados sobre o tema de diversos autores: Dias (1995), Souza e Sobreira (2015) e Zuquette e Gandolfi (2004). Entretanto, a adoção dos intervalos de declividade para normalização geotécnica de Bitar, Freitas e Ferreira (2012), aplicável à área de estudo caracterizada por terrenos oriundos de formações pré-cambrianas, associado ao refinamento da pedologia com as investigações de campo resultaram em maior especialização das semelhanças geomorfológicas para a adoção das unidades geotécnicas.

A combinação dos métodos apresentados para a elaboração de cartas geotécnicas é vantajosa sobretudo para municípios pequenos localizados no domínio morfoclimático Mares de Morros (AB-SÁBER, 2003), cujos terrenos compartilham a problemática intensidade dos processos

erosivos. A conjugação de dados sobre a pedologia com a geologia locais, para os quais há um vasto banco de dados abertos da EMBRAPA e CPRM sobre o território brasileiro em diferentes escalas, torna o método economicamente viável para esses municípios. Os únicos softwares comerciais utilizados no estudo foram o AutoCAD® e o Slide2®. Entretanto, a concepção de cartas geotécnicas pode ser realizada por unidades ligadas às áreas de geociências de institutos de pesquisa e universidades (BITAR, FREITAS e MACEDO, 2015), que possuem tais recursos para a elaboração dos mapas.

6. CONCLUSÕES

As análises de estabilidade realizadas por cenários padrão, nos três métodos de cálculo de estabilidade por equilíbrio limite (Bishop simplificado, Spencer e Morgenstern-Price) nas classes de declividades recomendadas por Bitar, Freitas e Ferreira (2012) mostraram que os cambissolos háplicos Tb distróficos são solos muito suscetíveis a processos erosivos,

e a ocorrência deles em terrenos com declividades consideráveis agravam esse aspecto. A antropização também piora esse quadro, visto que esse solo se torna ainda mais frágil quando perde sua cobertura, deixando-o mais exposto pela erosão através do transporte pluvial. As erosões de grande escala na porção oeste do município estão provavelmente correlacionadas à presença desses solos, visto que é uma região antropizada há muito tempo e utilizada para fins de monocultura e pastagem.

A retroanálise também apresentou bons resultados graças aos parâmetros obtidos na literatura, combinados com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados para o solo orgânico próximo à rua Joaquim Marquês da Silva. A definição das condições no modelo que simulou o escorregamento ocorrido foi aplicada para outras áreas da área de estudo, sinalizando que se deve estabelecer critérios mais rígidos para a ocupação dessas áreas, bem como o acompanhamento dos processos erosivos que ocorrem nelas atualmente.

Devido ao mapeamento de pedologia de Baruqui et al. (2006) ser de média intensidade e ao conhecimento da presença de solos orgânicos na região, as investigações de campo também se fizeram importantes para refinar a pedologia local e confirmar a presença desse solo ao longo das áreas mais baixas das bacias abrangidas pelo município. O mapeamento dos pontos coletados dentro do projeto do estudo no QGIS® possibilitou vislumbrar a ocorrência desses solos associada à presença de córregos (muitos inclusive severamente assoreados pela quantidade de matérias orgânicas presentes), e a continuidade deles ao longo dos fundos de vale.

Uma vez em que se alia o arcabouço teórico da metodologia apresentada com um banco de dados diversificado sobre a Unidade

Morfodinâmica de Interesse de Projeto e uma boa capacidade de análise, as cartas geotécnicas ganham mais importância em indicar regiões com semelhanças geomorfológicas e geotécnicas, que também apontam para a presença de processos erosivos em curso semelhantes e causas de escorregamento esperados. E, dessa forma, pode-se indicar recomendações aos municípios a partir desses documentos quanto à busca de estudos e trabalhos específicos para o tratamento desses locais, assim como o zoneamento dos usos de solo e o planejamento do direcionamento dos vetores de crescimento do município para áreas salubres.

Os resultados obtidos para a elaboração da carta geotécnica de suscetibilidade a movimentos de massa lançaram mão de estudos geotécnicos já acumulados, como a influência da declividade em terrenos antigos (BITAR; FREITAS; FERREIRA, 2012) e metodologias para elaboração de cartas geotécnicas propostas por Dias (1995) e Souza e Sobreira (2004), bem como o comportamento de solos orgânicos descrito por Antunes e Salomão (2018). Dessa forma, o presente trabalho apresenta metodologia que pode ser aplicada para outros municípios e regiões, dado o conhecimento de sua pedologia e geologia de substrato e outros aspectos locais à luz de investigações de campo, como a identificação dos solos locais e sinais de escorregamentos anteriores. Recomenda-se, ainda, a incorporação de sondagens e ensaios com amostras em laboratório, a fim de melhor descrição das estratigrafias e do comportamento mecânico dos materiais presentes nas UMIPs a se investigar.

7. REFERÊNCIAS

AB-SÁBER, A. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. 2ª Ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159 p.

ALMEIDA, E. P. C.; SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. Latossolos Vermelho-Amarelos. EMBRAPA, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-vermelho-amarelos>>. Acesso em: 15 out. 2022.

AMARO, V. E.; CARVALHO, R. C.; MATOS, M. de F. A. de; INGUNZA, M. D. P. D.; SCUDELARI, A. C. Avaliação da suscetibilidade do solo à erosão nas falésias do litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte. In: Revista Brasileira De Geomorfologia. Curitiba: UGB, v. 22, n° 1, p. 3–25, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1887>>. Acesso em: 15 set. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D 3080-04: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2012. 7 p.

ANA. Catálogo de metadados da ANA: base hidrográfica ottocodificada da bacia do rio grande. Homepage. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b13fa102-148d-4c4a-b7cd-02f23027e5c1>>. Acesso em: 04 mai. 2022.

ANA. Codificação de bacias hidrográficas pelo método de Otto Pfafstetter. ANA, 2014. 50 p. Apostila.

ANTUNES, F. S.; SALOMÃO, F. X. T. Solos em Pedologia. In: OLIVEIRA, M. A. S.; MONTICELI, J.J. (Editores). Geologia de Engenharia e Ambiental. 1ª Ed. São Paulo: ABGE, v. 2, cap. 5, p. 71-85, 2018.

ARAÚJO, J. P. C.; BARELLA, C. F.; FERNANDES, N. F. Modelagem da susceptibilidade de escorregamentos utilizando o método de pesos de evidência em uma região montanhosa de clima tropical. In: Revista Geociências UNESP. São Paulo: UNESP, v. 40, n. 1, p. 137-155, 2021. ISSN 1980-900X.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11.682: estabilidade de taludes. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 39 p.

AUTODESK. AutoCAD® (versão 2021). 2022. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>>.

BARELLA, C. F.; SOBREIRA, F. G.; ZÉZERE, J. L. A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of Minas Gerais state, Brazil. In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Berlin: Springer, v. 78, p. 3205-3221, 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-018-1341-3>>. Acesso em: 19 set. 2022.

BARUQUI, A. M. et al. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da zona Campo das Vertentes. In: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, v. 96, 2006. 326 p. ISSN 1678-0892.

BERNARDES, J. A. Investigação sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual de gnaiss. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BITAR, O. Y.; FREITAS, C. G. L.; FERREIRA, A. L. Classificação de declividade para fins de

normalização geotécnica em planejamento urbano: estudo em áreas de domínio pré-cambriano na região sudeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46, CONGRESSO DE GEOLOGIA DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 1., 2012, Santos. Resumo... Santos: Comunidade dos Países de Língua Portuguesa, 2012, 1 p. Disponível em: <<https://escriba.ipt.br/pdf/171029.pdf>>. Acesso em: 04 jul. 2022.

BITAR, O. Y.; FREITAS, C. G. L.; MACEDO, E. S. (org). Guia Cartas Geotécnicas: orientações básicas aos municípios. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2015. 27 p. (E-book)

BORODIAK, J. et al. Relação da precipitação pluviométrica e ação antrópica com os deslizamentos de terra ocorridos na escarpa da serra da esperança: evento de 29 de setembro de 2014. In: XVII Simpósio de Geografia Física Aplicada e I Congresso Nacional de Geografia Física: os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento. Campinas: Instituto de Geociências – UNICAMP, v. 1, p. 2274-2279, 2017.

CARNEIRO, M. A. et al. Carta geológica. Folha SF-23-X-A-IV – Oliveira. Rio de Janeiro: CPRM, 2007. Escala 1:100.000. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/11164/8/carta_geologica_folha_Oliveira.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2022.

CHILLETTO, R. de C. O. (coord). Governança Metropolitana no Brasil - Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá. Relatório de Pesquisa. Brasília: IPEA, 2013, n° 1.2, 78 p. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/governanca_metropolitana/relatorio%201.2_rmvc.pdf>. Acesso em: 20 set. 2022.

CODEMIG. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Rio de Janeiro: CPRM, 2014. Escala 1:1.000.000. Disponível em:

<<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>>. Acesso em: 06 mai. 2022.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: Landslides: Investigation and Mitigation. 1ª Ed. Washington: Transportation Research Board – National Research Council, 1996. v. 1, p. 36-75.

CRUZ, C. B. M.; MENEZES, P. M. L. de. A cartografia no ordenamento territorial do espaço geográfico brasileiro. In: ALMEIDA, F. G. de; SOARES, L. A. A. (Orgs.). Ordenamento Territorial: Coletânea de Textos com Diferentes Abordagens no Contexto Brasileiro. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p. 195-226.

DIAS, R. D. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. In: Revista do Instituto Geológico. São Paulo: Instituto de Geociências – USP, São Paulo, v. 16, n° esp., p. 51-55, 1995.

EIRAS, C. G. S.; SOUZA, J. R. G.; FREITAS, R. D. A. et al. Discriminant analysis as an efficient method for landslide susceptibility assessment in cities with the scarcity of predisposition data. In: Natural Hazards. Berlin: Springer, v. 107, p. 1427–1442, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11069-021-04638-4>>. Acesso em: 20 set. 2022.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. ver. ampl. Brasília: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013, 353 p.

FONSECA, L. A. M. et al. Avaliação da erodibilidade de um cambissolo de Juiz de Fora, Minas Gerais. In: Revista Geotecnia. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, n° 136, p. 143-156, 2016.

GOOGLE. 2022. São Tiago (s.l.): Google Maps, (s.l.). Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-20.9134612,->

44.5169223,1035m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 04 jul. 2022.

GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GALLI, M. Estimating the quality of landslide susceptibility models. In: *Geomorphology*. Amsterdam: ELSEVIER, v. 81, n° 1-2, p. 166-184, 2006.

GUZZETTI, F. Landslide hazard and risk assessment - concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslides susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. 373 p. PhD Thesis – Mathematisch Naturwissenschaftlichen Fakultät of Rheinischen Friedrich-Wilhelms, University of Bonn, Bonn, 2005.

IBGE. Censo brasileiro de 2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IBGE. Malhas territoriais. Sessão Geociências. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organi-zacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>>. Acesso em: 04 mai. 2022.

IEF. Instituto Estadual de Florestas: Base de Dados Georreferenciados. Sessão Geoprocessamento. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br/geoprocessamento/base-de-dados-georeferenciados>>. Acesso em: 03 mai. 2022.

OLIVEIRA, J. P. S. et al. Estudo geotécnico para recuperação de áreas degradadas e de instabilidade em torno da Rua Joaquim Marquês da Silva – Cidade de São Tiago/MG. São Tiago: Castelo Engenharia e Consultoria, 2017. 161 p.

PARIZZI, M. G. et al. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. In: *Geografias*. Belo Horizonte: Instituto de Geociências – UFMG, v. 6, n° 2, p. 49-68, 2010.

PORTUGAL, A. F. et al. Atributos químicos e físicos de um cambissolo háplico Tb distrófico

sob diferentes usos na zona da mata mineira. In: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n° 1, p. 249-258, 2008.

QGIS® Development Team. QGIS® Geographic Information System (versão 3.22). 2022. Disponível em: <https://QGIS.org/pt_BR/site/>.

ROCHA, W. W. et al. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). In: *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, n° 2, p. 297-303, 2002.

ROCSCIENCE. Slide2®. 2022. Disponível em: <<https://www.rocscience.com/software/slide2>>.

ROSA, M. L.; SOBREIRA F.G.; BARELLA, C.F. 2021. Landslide susceptibility mapping using the statistical method of Information Value: a study case in Ribeirão dos Macacos basin, Minas Gerais, Brazil. In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93(1), 2021. Anais... Rio de Janeiro: ABC, 2021, 19 p. DOI 10.1590/0001-3765202120180897.

SIQUEIRA, A. J. B., XAVIER, F. V., FIGUEREDO, R. R. D., DE FIGUEIREDO, D. M., & BARBOSA, G. N. Mapeamento Geoambiental detalhado com uso de SIG e dados livres como estratégia de baixo custo para planejamento territorial periurbano. In: *Revista Brasileira De Geomorfologia*. Curitiba: UGB, v. 23, n° 3, p. 1583–1609, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.20502/rbg.v23i3.1994>>. Acesso em: 20 set. 2022.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. In: *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. São Paulo: ABGE, v. 2, n° 1, p. 79-97, 2012.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. Procedimentos para elaboração de cartas geotécnicas no

planejamento urbano. In: Revista Brasileira de Cartografia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, v. 67, n° 1, p. 141-156, 2015.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY. Earth resources observation and science (EROS) center. Homepage. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/eros>>. Acesso em: 02 jul. 2022.

WAGENER, T.; FRANKS, S. Regional hydrological impacts of climate change – impact assessment and decision-making. In: WAGENER, T. et al, eds. Regional Hydrological

Impacts of Climate Change – Impact Assessment and Decision-making. Wallingford: IAHS Press, p. 1-8, 2005.

Y2 TECH. UTM Geo Map® (versão 3.6.4). 2022. Disponível em: <<http://www.yogantara.com/>>

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. Cartografia geotécnica. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 190 p.

Submetido em 23/01/2023
Aceito em 27/10/2023