



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE)
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS (CFCH)
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (PPGEO)

GILBERTO CORREIA DOS SANTOS

**CENÁRIOS DE PERIGO A ESCORREGAMENTOS UTILIZANDO O MODELO
REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA) NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (RMSP-SP)**

Recife

2024

GILBERTO CORREIA DOS SANTOS

**CENÁRIOS DE PERIGO A ESCORREGAMENTOS UTILIZANDO O MODELO
REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA) NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (RMSP-SP)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGEQ, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Regionalização e Análise Regional.

Orientador: Prof. Dr. Fabrizio de Luiz Rosito Listo.

Recife

2024

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Gilberto Correia Dos.

Cenários de perigo a escorregamentos utilizando o modelo Rede Neural Artificial (RNA) no Município de São Paulo (RMSP) / Gilberto Correia Dos Santos. - Recife, 2024.

142 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2024.

Orientação: Fabrizio de Rosito Listo.

1. Escorregamentos; 2. Análise de Perigo; 3. Redes Neurais Artificiais; 4. R. Landslide; 5. Sistemas de Informação Geográficas; 6. Cidade de São Paulo. I. Listo, Fabrizio de Rosito. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 910

GILBERTO CORREIA DOS SANTOS

**CENÁRIOS DE PERIGO A ESCORREGAMENTOS UTILIZANDO O MODELO
REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA) NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (RMSP-SP)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGeo, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Regionalização e Análise Regional.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrizio de Luiz Rosito Listo - Orientador

Docente do Departamento de Ciências Geográficas – UFPE

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Bispo

Secretaria de Estado da Educação e da Ciência e Tecnologia da Paraíba
(SEECTPB)

Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves

Núcleo de Tecnologia - CAA - UFPE

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa à minha querida mãe Mercês Correia da Silva Santos, à minha “segunda mãe” Doralice Correia Fróis, à minha tia/mãe Maria Correia de Jesus e à minha avó/mãe Marieta Gonçalves da Silva, ambas In Memoriam.

AGRADECIMENTOS

A trajetória desta pesquisa foi um tanto quanto trabalhosa, porém, ao mesmo tempo prazerosa. Foram altas noites sem sono, até mesmo porque, lidar com algo que não conhecemos, como foi o caso do procedimento utilizado nessa dissertação, nos força a um grau de adrenalina maior e, ainda mais, com o advento ao período pandêmico vivido por todo o mundo.

Portanto, desejo manifestar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste estudo.

Agradeço aos dezenove anjos peludos e alados que apareceram na minha vida em um momento preciso, me trazendo alegria, carinho, arranhões e bicadas: Petra (In Memoriam), Grude, Arthur, Ninita, Thainã, Frodoarda, Paulinha, Lancelot, Guinevere, Tequila Baby, Scarlet e Penny, e os agregados: Luar, Solo, Boulos, Morgana e Kiara e às calopsitas Tito e Tita. São eles (as) as minhas adoráveis criaturas.

Agradeço à minha ex-companheira, Naturopata, Reikiana e hoje grande amiga, Débora Godeghese de Miranda, pelas constantes palavras de incentivos e pelas suas orações. Àqueles que acreditaram na minha potencialidade, em especial Marli e Francisco Beltrão (Chicão); aos meus amigos do Grupo Hits da Galera, em especial ao casal Márcia e Roberto Serrano, pelas prosas e por jamais duvidarem da minha capacidade como pesquisador, ao meu parceiro de violão e grande amigo Roberto Bernardes e à minha querida amiga Jéssica Carvalho, assim como à minha querida amiga, Geógrafa e Professora Luanda Pestana, pela mesma razão.

Às minhas queridas amigas e Geógrafas Cristina Vieira e Thabata Regina Carvalho, pelas palavras de apoio, por acreditarem no meu potencial e pelo companheirismo, desde os tempos da Graduação.

À minha irmã, Ieda Maria da Silva e às minhas primas/irmãs Eliane, Eluziane e Rosimeire, que, assim como minhas “mães”, ajudaram na minha criação e ao meu tio Manoel Correia (In Memoriam).

Ao meu querido Rubens Xavier (Binho) – In Memoriam, que em vida, sempre me direcionou palavras de incentivo. À turma do Bar do Paulinho, pelas risadas e por

permitirem que eu alugasse os seus ouvidos com minhas falas, em sua maioria, técnicas.

Em especial, agradeço à Lucimara Bragagnolo, José Mário Vicensi Grzybowski e Roberto Valmir da Silva, por disponibilizarem a rede neural artificial **módulo R. landslide** de forma gratuita e pela atenção a mim ofertada, a fim de sanar as dúvidas e erros decorrentes durante a sua execução.

Agradeço ao Professor Doutor Fabrizio de Rosito Listo, pela orientação e paciência durante as longas fases desta pesquisa, assim como à minha querida amiga e orientadora (durante a graduação) Professora Mestre (futura doutora) Fabiana Souza Ferreira, pelo companheirismo, trabalhos de campo, ensinamentos e aprendizados e pelo incentivo, de longa data, para que eu seguisse os meus estudos, me direcionando ao Mestrado.

Aos Professores Doutores Carlos de Oliveira Bispo e Rodrigo Mikosz Gonçalves, pelo aceite e pela composição da banca examinadora desta pesquisa.

À todos os integrantes do Grupo de Pesquisa em Geotecnologias Aplicadas à Geomorfologia de Encostas e Planícies (ENPLAGEO) e a todos do Programa Pós-Graduação em Geografia – PPGeo – UFPE, em especial ao secretário Eduardo Vêras, obrigado, de coração, pela sua atenção. Aos meus amigos Mestre Felipe Marangoni, Mestra Keila Ferreira e às futuras Doutoradas Verônica Gurgel e Geovania Ricardo dos Santos pelas ideias trocadas e pelos perrengues passados no decorrer do mestrado, somos vitoriosos meus caros.

À Pró-Reitoria da UFPE, ao Prof. Dr. Francisco Kennedy Silva dos Santos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de estudos a mim ofertada.

E não obstante, agradeço à Deus, essa Força Poderosa que, além de me conduzir nas trilhas da pesquisa e do conhecimento, colocou todos acima citados no meu caminho.

EPÍGRAFE

Mais importante (...) é a ratificação da ideia fértil de que os geógrafos tem a responsabilidade de investigar a posição dos agrupamentos humanos num espaço de organização dupla: uma organização natural, herdada dos processos fisiográficos e ecológicos, e uma organização imposta pela história das construções humanas no espaço geográfico, que é o próprio somatório da inúmeras implantações realizadas pelos agrupamentos que se sucederam no tempo, construindo coisas e organizando espaços em uma determinada parcela do território (AB'SÁBER, 1969).

RESUMO

Escorregamentos de terra podem caracterizar-se como eventos perigosos e causar danos sociais e econômicos. Nas últimas décadas, governos, municípios e instituições de pesquisas investiram recursos consideráveis na avaliação e na mitigação destes eventos. Assim, diferentes modelos matemáticos têm sido amplamente utilizados para avaliação de perigo, suscetibilidade e risco a estes processos em escala nacional e internacional. Desta maneira, o objetivo desta dissertação foi criar e avaliar dois cenários de perigo a escorregamentos de terra na cidade de São Paulo (SP), utilizando as Redes Neurais Artificiais (RNA), modelo que se destaca na previsão destes processos devido à sua elevada precisão nos resultados. Para tanto, foram extraídos 16 parâmetros morfológicos a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT) *Copernicus DEM* com resolução de 30 metros, além das amostras de escorregamentos e não escorregamentos para serem utilizadas como dados de entrada da RNA para a modelagem e elaboração do Cenário 1. A partir do resultado da análise de sensibilidade feita pela RNA, foi possível excluir aqueles parâmetros de menor relevância; este processo foi crucial para a modelagem e elaboração do Cenário 2. O mapa de ocorrências foi construído a partir dos dados tabulares fornecidos pela Defesa Civil – SP, de onde foram extraídos 433 pontos de ocorrências de escorregamentos na cidade de São Paulo ocorridas no ano de 2019. Para a validação destes processos, a Curva ROC (AUC) foi utilizada para examinar a generalização e a precisão da previsão dos dois cenários. Como resultado, o Cenário 2 obteve a maior área sob a curva (AUC) com valor de 92,3%, seguido do Cenário 1 com 92,1%. Analisando os mapas, nota-se que os escorregamentos aconteceram, em sua maioria, em locais que possuem alta declividade, moradias autoconstruídas e com intensa urbanização. Tal combinação espacial de condições precárias e atividades antrópicas pode ser considerada uma contraindicação para a permanência de moradores nestas áreas. Espera-se que, a partir dos dados finais obtidos a partir das técnicas de Geoprocessamento e do uso do Modelo de Redes Neurais Artificiais (RNA), tenha-se uma análise mais apurada no que se refere às áreas mais perigosas a escorregamentos na cidade de São Paulo.

Palavras-chave: Escorregamentos, Análise de Perigo, Inteligência Artificial, Redes Neurais Artificiais, R. landslide, Sistemas de Informação Geográficas, Cidade de São Paulo.

ABSTRACT

Landslides can be characterized as dangerous events and cause social and economic damage. In recent decades, governments, municipalities and research institutions have invested considerable resources in assessing and mitigating these events. Thus, different mathematical models have been widely used to assess the danger, susceptibility and risk of these processes on a national and international scale. The aim of this dissertation was to create and evaluate two landslide hazard scenarios in the city of São Paulo (SP), using Artificial Neural Networks (ANN), a model that stands out in predicting these processes due to its highly accurate results. To this end, 16 morphological parameters were extracted from the Copernicus DEM Digital Terrain Model (DTM) with a resolution of 30 meters, as well as samples of landslides and non-landslides to be used as input data for the ANN for modeling and preparing Scenario 1. Based on the result of the sensitivity analysis carried out by the ANN, it was possible to exclude the least relevant parameters; this process was crucial for modeling and preparing Scenario 2. The occurrence map was built from tabular data provided by Civil Defense - SP, from which 433 points of landslide occurrences in the city of São Paulo in 2019 were extracted. To validate these processes, the ROC Curve (AUC) was used to examine the generalizability and forecast accuracy of the two scenarios. As a result, Scenario 2 obtained the highest area under the curve (AUC) of 92.3%, followed by Scenario 1 with 92.1%. An analysis of the maps shows that most of the landslides occurred in places with high slopes, self-built houses and intense urbanization. This spatial combination of precarious conditions and anthropic activities can be considered a contraindication for residents to remain in these areas. It is hoped that the final data obtained from geoprocessing techniques and the use of the Artificial Neural Network (ANN) model will provide a more accurate analysis of the most dangerous areas for landslides in the city of São Paulo.

Keywords: Landslides, Hazard Analysis, Artificial Intelligence, Artificial Neural Networks, R. landslide, Geographic Information Systems, City of São Paulo.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cicatriz de escorregamento rotacional (linhas vermelhas) ocorrido no ano de 2019 na Avenida Miguel Stéfano altura do Jardim Zoológico – São Paulo/SP. As setas indicam a direção do material mobilizado	22
Figura 2 - Obra de contenção realizada em uma cicatriz de escorregamento translacional ocorrido no ano de 2019 na Rua Miguel Fernandes, Bairro Iguatemi – São Paulo/SP. As setas indicam a presença de canos saindo das residências em direção à encosta	23
Figura 3 - Escorregamento rotacional (linhas vermelhas) em cortes artificiais (retaludamento) em terreno para construção de vias de acesso (linhas escuras) a uma empresa na cidade de Santo André – SP	27
Figura 4 - Perfil hipsométrico e mapa de localização da Região Metropolitana de São Paulo	29
Figura 5 - Cicatriz de escorregamento de terra ocorrido no Bairro Parque Paulista - Franco da Rocha – RMSP. A linha amarela indica o ponto de ruptura	31
Figura 6 - Carta de eventos perigosos utilizando coeficientes de regressão logística: (a) Penang, (b) Cameron, (c) Selangor, Malásia (Pradhan, 2010)	35
Figura 7 - Modelo simples de neurônio artificial, unidade de limiar linear de McCulloch e Pitts (1943)	38
Figura 8 - Arquitetura da rede neural Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP) com uma camada oculta	42
Figura 9 - Interface principal do módulo r. landslide. Nesta aba é possível escolher as quatro principais opções que são: parâmetros da RNA, treinamento, aplicação e opcional	44
Figura 10 - Mapas de suscetibilidade a escorregamentos: (a) mapa gerado pelo módulo r. landslide (b) mapa de suscetibilidade a escorregamentos publicado pela CPRM	47
Figura 11 - Mapa de localização e Perfil Hipsométrico da cidade de São Paulo - RMSP	49
Figura 12 - Mapa de setorização de área de risco geológico e favelas por subprefeituras – São Paulo - RMSP	52

Figura 13 - Mapa de áreas de risco geológico e favelas por distritos – São Paulo – RMSP	53
Figura 14 - Fotografia aérea oblíqua obtida em sobrevoo de helicóptero, cujas setas indicam as residências em situação de perigo a escorregamento de terra – Bairro do Grajaú -. Zona Sul da cidade de São Paulo (SP)	54
Figura 15 - Fotografia aérea oblíqua obtida em sobrevoo de helicóptero, cujas setas indicam a presença de uma aglomeração urbana em encosta de alta declividade – Parque do Carmo -. Zona Leste da cidade de São Paulo (SP)	55
Figura 16 - Fotografia aérea oblíqua obtida em sobrevoo de helicóptero, cujas setas indicam as moradias em situação de perigo a escorregamento de terra – Jardim Hebron - Jaçanã - Zona Norte da cidade de São Paulo (SP)	56
Figura 17 - Estrutura geológica da cidade de São Paulo	57
Figura 18 - Mapa Geomorfológico da cidade de São Paulo	62
Figura 19 - Unidades de relevo presentes na cidade de São Paulo – RMSP	63
Figura 20 - Mapa da subdivisão das unidades climáticas locais de São Paulo – SP	66
Figura 21 - Localização do município de São Paulo no contexto da Bacia Alto Tietê e Vertente Atlântica	69
Figura 22 - Mapa Pedológico da cidade de São Paulo	71
Figura 23 - Classes de uso e ocupação da terra.....	73
Figura 24 - Fluxograma dos processos de modelagem e validação dos Cenários 1 e 2	78
Figura 25 - Parâmetros morfológicos utilizados na elaboração dos cenários de perigo	81
Figura 26 - (A) Fotografia obtida em trabalho de campo realizado no bairro Jardim Corisco na região da subprefeitura de Jaçanã-Tremembé-Zona Norte, e (B) fotografia aérea do bairro do Campo Limpo - Zona Sul obtida durante o sobrevoo de helicóptero realizado no dia 01/12/2021 – São Paulo – SP. As setas apontam residências em área de perigo a escorregamentos.....	93
Figura 27 - Parâmetros de escorregamentos e não escorregamentos utilizados para treinamento, validação e teste.....	97
Figura 28 - Mapa da rota do sobrevoo de helicóptero realizado no mês de dezembro de 2021 para a obtenção de imagens aéreas oblíquas de áreas de risco existentes na cidade de São Paulo	102

Figura 29 - Exemplo de fotografia aérea obtida durante o sobrevoo de helicóptero realizado no dia 02/12/2021 – São Paulo (SP). Na imagem, as setas apontam casas em local de intensa vulnerabilidade e obra de contenção de encosta – Vila Dania Mungo Park – Zona Leste – São Paulo.....	103
Figura 30 - Inventário de escorregamentos ocorridos na cidade de São Paulo – SP	106
Figura 31 - Mapa de isoietas e gráfico de chuva média acumulada ocorrida na cidade de São Paulo no mês de janeiro de 2019	107
Figura 32 - Mapas de Geologia e Geomorfologia com os pontos de escorregamentos sobrepostos.....	108
Figura 33 - As imagens correspondem a exemplos de cortes em relevos para construção de residências. Na figura A, obra de contenção em cicatriz de escorregamento ocorrido em corte de relevo para construção de moradias no Jardim Corisco, Zona Norte de São Paulo. Na figura B, a seta indica corte em relevo para construção de moradia na região do Jardim Damasceno, Zona Norte de São Paulo	110
Figura 34 - Mapa de perigo do Cenário 1 com pontos de ocorrências de escorregamentos sobrepostos	112
Figura 35 – Gráfico de frequência de distribuição (%) por classes de perigo (Cenário 1).....	113
Figura 36 - Moradias autoconstruídas em local com declividade acentuada e em situação de perigo a escorregamentos muito alto localizadas no bairro Jardim Elba, Zona Leste (A) e Jardim Vista Alegre (B), Zona Norte de São Paulo. As setas amarelas indicam a direção da encosta.....	115
Figura 37 - Mapa de perigo do Cenário 2 com pontos de ocorrências de escorregamentos sobrepostos	116
Figura 38 - Gráfico de frequência de distribuição (%) por classes de perigo (Cenário 2).....	117
Figura 39 - Correlação entre os Cenários 1 e 2 com os pontos de ocorrências sobrepostos.....	120
Figura 40 - Gráfico de frequência de distribuição (%) por classes de perigo (Cenários 1 e 2)	120

Figura 41 - Gráfico de Curva ROC (Curva Característica de Operação do Receptor) e taxa de predição. Nesta análise, a AUC para validação dos dados de saída da RNA, superou o limiar de 0,9, sendo, respectivamente, 0,921 (92,1%) e 0,923 (92,3%), indicando excelente precisão para ambos os cenários122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Caracterização dos principais grupos de movimentos de massa conforme a classificação de Augusto Filho (1992).....	20
Quadro 2 - Agentes, causas e processos relacionados a escorregamentos de terra	26
Quadro 3 - Definição simplificada dos instrumentos de parcelamento de Uso Ocupação da Terra na cidade de São Paulo, em referência à Figura 23.....	74
Quadro 4 - Definição simplificada dos parâmetros morfológicos.....	85
Quadro 5 - Recorte da tabela de ocorrências cedida de Defesa Civil de São Paulo. As células em destaque contêm os dados referentes à Figura 1 e à Figura 2	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada utilizados no Cenário 1 e 2, as linhas selecionadas correspondem aos parâmetros excluídos após verificação da análise de sensibilidade, após a exclusão, os parâmetros restantes foram utilizados para a modelagem do Cenário 2	95
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.1 OBJETIVOS	18
2 EMBASAMENTO TEÓRICO-CONCEITUAL	19
2.1 ESCORREGAMENTOS: BASES CONCEITUAIS, TIPOLOGIAS, FATORES CONDICIONANTES E HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP) E CARTAS DE PERIGO	19
2.1.1 <i>Histórico de escorregamentos na Região Metropolitana de São Paulo</i>	28
2.1.2 <i>Cartas de perigo e conceitos relacionados</i>	31
2.2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)	36
2.2.1 <i>Principais modelos de RNAs, arquiteturas e estruturas internas e modelagens em RNA</i>	38
2.2.2 <i>Trabalhos desenvolvidos (RNAs)</i>	44
3 A METRÓPOLE DE SÃO PAULO (RMSP), SEUS ASPECTOS FÍSICOS E ANTRÓPICOS	48
3.1 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	56
3.2 CLIMA, HIDROGRAFIA, SOLOS E VEGETAÇÃO	64
3.3 USO DA TERRA, ÁREAS DE RISCO E ESCORREGAMENTOS NA CIDADE DE SÃO PAULO	72
4 MATERIAIS E MÉTODOS	78
4.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA RNA	79
4.2 ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PERIGO	94
4.3 ELABORAÇÃO DO MAPA DE INVENTÁRIO (ESCORREGAMENTOS)	99
4.4 VALIDAÇÃO	103
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	105
5.1 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS	105
5.2 CENÁRIOS DE PERIGO	111
5.2.1 <i>Cenário 01</i>	111

5.2.2 <i>Cenário 02</i>	115
5.3. VALIDAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PERIGO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MÓDULO R. LANDSLIDE	119
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
REFERÊNCIAS.....	128

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Escorregamentos são processos naturais ou induzidos pela ação antrópica que podem ocorrer em qualquer escala, internacional e nacional. De acordo com a UNISDR (2017) - (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction and Center for Research on Epidemiology of Disasters*)¹, no período entre 1998 e 2017, aproximadamente 4,8 milhões de pessoas foram atingidas por escorregamentos, dos quais, cerca de 18.000 vidas foram perdidas (Mizutori e Guha-Sapir, 2017).

As estatísticas do Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR) indicam que aproximadamente cinco milhões de pessoas em todo o mundo foram afetadas por escorregamentos, além de perdas econômicas avaliadas em 2,908 milhões de dólares, onde as perdas relatadas aumentaram na ordem de 251% em 20 anos (Mizutori e Guha-Sapir, 2017).

Em linhas gerais, os países mais atingidos são aqueles de renda mais baixa, que, em virtude de seu processo de ocupação excludente, passaram por uma elevação de cenários de vulnerabilidade social, tais como, ocupações precariamente instaladas em áreas de perigo e em diversas situações perigosas.

Neste cenário, conforme IBGE (2018), somente no Brasil mais de 8 milhões de moradores vivem em áreas de perigo com potencial elevado a ocorrências de enchentes, inundações e escorregamentos de terra em 872 municípios brasileiros. Destes, quatro deles localizam-se na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP): São Paulo, São Bernardo do Campo, Santo André e Guarulhos.

Vale destacar que no estado de São Paulo, de acordo com Instituto Geológico (2016), entre os anos 2000 e 2015, 479 municípios foram atingidos por algum tipo de evento geodinâmico, dos quais 1430 acidentes tiveram causa comprovada a escorregamentos de terra, afetando 971.849 pessoas (Brollo; Ferreira, 2016).

Em anos anteriores, um levantamento de áreas de risco elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), sob coordenação da então Secretaria Municipal de Coordenação das Subprefeituras (SMCS - SP) realizado no ano de 2010 na cidade de São Paulo, indicou 407 áreas de risco

¹ Estratégia Internacional das Nações Unidas para Redução de Desastres e Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres.

geológicos, setorizadas em 1.182 áreas. Nesta pesquisa, os locais de maior incidência estavam localizados na zona sul da cidade, mais precisamente nas subprefeituras de M'Boi Mirim, Capão Redondo e Jardim Ângela (Jornal Folha de São Paulo, 2021). No entanto, os dados mais recentes, mensurados entre os anos de 2016 e 2022, indicaram um diagnóstico de 481 áreas de risco e 1330 setores de risco na cidade de São Paulo (GeoSampa, 2022).

Diante da complexidade de realização de mapeamentos de perigo a escorregamentos, novos métodos para modelagem, integrados às tecnologias e aos Sistemas de Informações Geográfica (SIG) começaram a ser aplicados, como a Lógica Difusa, a Regressão Logística, a Floresta Aleatória e as Redes Neurais Artificiais (RNAs). Vale ressaltar que as RNAs são metodologias utilizadas para apresentar as correlações entre a distribuição de escorregamentos e os seus fatores causais (Ercanoglu; Gokceoglu 2002; Ercanoglu *et al.* 2004, Lee, 2005, Bi *et al.* 2014).

No tocante às RNAs, em 1943, McCulloch e Pitts idealizaram um modelo matemático que simulava o funcionamento de um neurônio biológico. Em 1949, Donald Hebb propôs uma lei de aprendizagem especificamente criadas para as sinapses dos neurônios: a regra de Hebb, sendo essa a primeira metodologia de treinamento de uma RNA (Nola, 2015). Em anos posteriores, Frank Rosenblatt (1958) criou a rede *Perceptron*; Widrow e Wolf (1960) o Adaline (*Adaptive Linear Element*); Hopfield (1982; 1985) a Rede Hopfield e em 1986, Rumelhart, Hilton e Williams criaram o primeiro algoritmo de retropropagação.

As RNAs baseadas no modelo de retropropagação têm sido utilizadas em diversas aplicações como na área de Engenharia (Nola, 2015); Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (Gameiro, 2020); Ciência e Tecnologia Ambiental (Bragagnolo, 2021) e Engenharia de Produção (Azevedo, 2022).

Neste cenário, a Rede Neural Artificial tornou-se uma abordagem prática para analisar a estabilidade de encostas assim como a suscetibilidade, o perigo e o risco a escorregamentos. Por exemplo, a avaliação da estabilidade de um único escorregamento pode ser realizada com base em seus dados de monitoramento e condições de contorno investigadas (Neaupane; Achet 2004; Wang *et al.* 2005), e na avaliação da suscetibilidade a estes processos no rompimento de encostas (Gomez; Kavzoglu 2005; Kawabata; Bandibas 2009; Chen *et al.* 2019).

Assim, o presente estudo tem como objetivo principal, a utilização de redes neurais artificiais para o mapeamento, modelagem e elaboração de 2 cenários de perigo a escorregamentos na cidade de São Paulo indicando aquele com maior incidência a ocorrências de eventos geodinâmicos, e, porventura, auxiliar o poder público na tomada de decisão no que se refere às áreas impróprias à ocupação humana, como os terrenos de alta declividade situados nas bordas da Bacia de São Paulo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é **avaliar o perigo a escorregamentos a partir da aplicação do modelo Rede Neural Artificial (RNA) na cidade de São Paulo (RMSP/SP)**. Visando cumprir o objetivo principal, os objetivos específicos são:

- a) Analisar a distribuição das ocorrências de escorregamentos;
- b) Elaborar e comparar dois cenários de perigo e;
- c) Avaliar o melhor cenário de perigo.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO-CONCEITUAL

2.1 ESCORREGAMENTOS: BASES CONCEITUAIS, TIPOLOGIAS, FATORES CONDICIONANTES E HISTÓRICO DE OCORRÊNCIAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP) E CARTAS DE PERIGO

Escorregamentos integram o grupo de movimentos de massa, isto é, são processos que ocorrem naturalmente, fazendo parte da dinâmica da Terra, com capacidade de causar alterações profundas e moldar as configurações do relevo (Augusto Filho, 1992; Fernandes; Amaral, 1996). Podem ser impelidos pela ação de outros agentes, como o gelo e a água, quando superam e reduzem as forças da resistência destes materiais com o solo, rochas e detritos (Cruden; Varnes, 1996, IPT, 2007). São processos que podem ocorrer em diversas paisagens, normalmente de intensa declividade e, principalmente, em períodos prolongados de chuvas (Carvalho; Galvão, 2006).

Embora sejam processos naturais, WP/WLI (1993) aponta que os escorregamentos, quando associados a outros eventos como terremotos, vulcanismos e precipitações intensas em meio tropical - ou mesmo agindo isoladamente - provocam acidentes (ex. bloqueios de estradas e rodovias) ocasionando prejuízos materiais, sobretudo em áreas urbanas, além de perdas humanas (Fernandes *et al.* 2001).

Por seu grau de complexidade e pela tipologia dos materiais envolvidos, os movimentos de massa receberam diferentes classificações. Estas classificações são baseadas no dinamismo do movimento e na interação entre o volume de massa que se movimenta, assim como na estabilidade do terreno e na velocidade com que estes se movem, no tipo de material envolvido, considerando a sua estrutura, textura e conteúdo de água, bem como, sua geometria e movimento, ou seja, pelo seu formato e pela sua dimensão (Varnes, 1978; Augusto Filho, 1992; Selby, 1993).

Desse modo, na literatura internacional, foram caracterizadas diversas subdivisões para os diferentes tipos de movimentos de massa, dentre os quais se destacam as de Skempton e Hutchinson (1969), Hutchinson (1988), Varnes (1978), Sassa (1985), Cruden (1993), Cruden; Varnes (1996), Hungr, Leroueil e Picarelli (2014), Cruden e Lan (2015). A partir da década de 1960, as classificações

começaram a surgir na literatura nacional, como em Freire (1965) e, nas décadas de 1980 e 1990, com Guidicini; Nieble (1984) e Augusto Filho (1992).

Dentre as classificações supracitadas, esta pesquisa utilizará a sistematização sugerida por Augusto Filho (1992), que caracterizou os principais tipos de movimentos de massa nas encostas brasileiras (Quadro 01). Deve-se ressaltar, no entanto, que, conforme Fernandes *et. al.* (2001), classificar diretamente os tipos de movimentos de massa não é uma tarefa simples em virtude das ações antrópicas e às modificações que, ao longo do tempo, acontecem nas cicatrizes e à complexidade das ocorrências.

A classificação composta por Augusto Filho (1992) tornou-se uma diretriz para a construção de mapas de risco e de perigo no Brasil. Nela são expostos os principais grupos de movimentos de massa que ocorrem no relevo nacional e seus atributos (como materiais, velocidade e geometria mobilizada) subdivididos em: rastejos (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*).

Quadro 1 - Caracterização dos principais grupos de movimentos de massa conforme a classificação de Augusto Filho (1992)

TIPO DE MOVIMENTO	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejos (<i>creep</i>)	• Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada • Geometria indefinida
Escorregamentos (<i>slides</i>)	• Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material. • Geometria e materiais variáveis • Planares – solos pouco espessos, solo e rochas com um plano de fraqueza • Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas • Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (<i>falls</i>)	• Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso

	• Pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos etc. • Rolamento de matacão • Tombamento
Corridas (<i>flows</i>)	• Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992).

Na classificação de Augusto Filho (1992), os escorregamentos são caracterizados como movimentos de materiais ao longo das encostas, em sentido descendente e para fora da mesma, agindo sob influência direta da gravidade, contendo solo, rocha, material orgânico ou um conjunto de ambos. A ocorrência de um escorregamento se dá quando a força da gravidade prevalece ante o atrito entre as partículas, deslocando toda a massa encosta abaixo (Varnes, 1978, USGS², 1982; Selby, 1993, Dias; Herrman, 2002, Fell *et al.* 2008; Highland; Bobrowsky, 2008; Cruden; Lan, 2015).

Constituem-se em deformação de cisalhamento e deslocamento por toda a extensão de uma ou mais áreas visíveis ou agindo internamente em uma zona parcialmente estreita, com possibilidade de se propagar inicialmente de uma área local que tornará a ser a superfície da ruptura. O material deslocado aumenta o seu volume a partir de uma área no local da ruptura (Varnes, 1978; USGS, 1982; Cruden; Varnes, 1996; Dias; Herrman, 2002; Highland; Bobrowsky, 2008; Cruden; Lan, 2015).

Os escorregamentos e a remoção de materiais como solo e rocha ocorrem, geralmente, no decurso de ambientes inclinados e planos e, regularmente, em eventos pluviais, em meio a um período úmido, durante ocorrências de chuva de alta intensidade, embora a precipitação não seja o único fator condicionante (De Ploey; Cruz, 1979; Carneiro; Almeida, 1998; Coelho Netto *et al.* 2011). Podem ocorrer para além da área de ruptura, possibilitando distinguir todo o conjunto de material que

² USGS – *United States Geological Survey* (Serviço Geológico dos Estados Unidos).

sofreu mobilização daquele material que não foi deslizado (USGS,1982; Augusto Filho,1992; Fernandes; Amaral, 2003; Tominaga *et al.* 2012).

Logo, conforme as características do volume mobilizado, do perfil geométrico dos materiais removidos e do plano de ruptura, os escorregamentos podem ser segmentados em: circulares ou rotacionais, translacionais ou planares e em cunha (USGS, 1982; Augusto Filho, 1992; Fernandes; Amaral, 2003; IPT, 2007).

Os escorregamentos rotacionais (Figura 1) ocorrem em encostas originadas de rochas sedimentares, como folhelhos e siltitos onde os materiais são mais espessos e homogêneos (Dias; Herrman, 2002; IPT, 2007; CPRM, 2014); em rochas muito fraturadas, em aterros, barragens e escavações, estando relacionados à lixiviação da água em profundidade (Bonuccelli, 1999; Dias; Herrman, 2002; Amaral Junior, 2007; Tominaga *et al.* 2009; CPRM, 2014; Corteletti, 2017).

Figura 1 - Cicatriz de escorregamento rotacional (linhas vermelhas) ocorrido no ano de 2019 na Avenida Miguel Stéfano altura do Jardim Zoológico – São Paulo/SP. As setas indicam a direção do material mobilizado



Fonte: O Autor (2019).

A sua deflagração está, na maioria das vezes, relacionada a entalhes na base desses materiais, seja artificialmente para implantação de uma estrada, ou mesmo naturais, cuja origem possa advir de uma erosão fluvial no sopé da encosta, sendo um fenômeno recorrente nas encostas do sudeste brasileiro (Selby,1982; USGS, 1982; Fernandes; Amaral, 1996, 2016; Bonuccelli, 1999; Highland; Bobrowsky, 2008; Tominaga *et al.* 2009).

Possui uma ou mais unidades que são caracterizadas por um plano de falha curvo, côncavo para cima e bem definido, provocados por movimentos abruptos e rotacionais do solo e por falhas relacionadas a aspectos geológicos ou induzido pela ação antrópica (Guerra, 2007; Pinto *et al.* 2012). Em locais de alta declividade o perfil geométrico assume caráter cilíndrico, cujo eixo se posiciona simultaneamente à direção do declive (Varnes, 1978; USGS, 1982; Selby, 1993; Fernandes; Amaral, 1996, 2016; Amaral Junior, 2007).

Os escorregamentos translacionais ou planares (Figura 2) possuem uma superfície de ruptura com formato aplainado, correlacionadas com irregularidades relativas aos sistemas hidrológicos (Fernandes; Amaral, 1996; Fernandes *et al.*, 2001; Tominaga 2007). São desencadeados, geralmente, em chuvas prolongadas cujo plano de ruptura varia entre 0,5 e 5,0 metros (Selby, 1993; Fernandes; Amaral, 1996).

Figura 2 - Obra de contenção realizada em uma cicatriz de escorregamento translacional ocorrido no ano de 2019 na Rua Miguel Fernandes, Bairro Iguatemi – São Paulo/SP. As setas indicam a presença de canos saindo das residências em direção à encosta



Fonte: O Autor (2021).

Neste tipo de escorregamentos, a deformidade e a heterogeneidade do material são muito intensas, haja vista a composição do material processado ser

diversificada. A movimentação de maior intensidade ocorre em superfícies relativamente aplainadas cuja massa em movimento pode se desintegrar e transformar-se em fluxo de detritos (Varnes, 1978, USGS, 1982; Cruden; Varnes, 1996; Amaral Junior, 2007; Highland; Bobrowsky, 2008; Cruden; Lan, 2015).

Diferente do escorregamento rotacional, cuja massa movimentada tende a se estabilizar a jusante da encosta, no escorregamento translacional a estabilidade somente acontece quando as forças que atuam diretamente na massa em movimento diminuem em relação às forças resistentes (Amaral Junior, 2007).

Os escorregamentos translacionais estão comumente associados a algum tipo de fraqueza originada por descontinuidade mecânicas e/ou hidrológicas causadas por processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos (Tominaga, 2007). Em casos de movimento em solo, a primeira evidência de sua ocorrência é a surgência de trincas no solo, assim como, o aumento positivo da pressão no solo e a diminuição do Fator de Segurança (Varnes, 1978; Cruden; Varnes, 1996; Fernandes *et al.* 2001; Cruden; Lan, 2015).

Os escorregamentos em cunha derivam da associação entre saprolitos e estrutura rochosa, cuja presença de dois planos frágeis contrários ao equilíbrio da estrutura, condicionam o movimento por toda a extensão da base de confluência (intersecção de dois planos de fraqueza) (Tominaga, 2007; IPT, 2007). De forma geral, ocorrem em encostas de corte ou em encostas naturalmente desconfiadas pela erosão, ou por escorregamentos pretéritos ou ainda pela ação antrópica (Infanti Junior; Fornasari Filho, 1998; Tominaga, 2007; IPT, 2007, Pinotti; Carneiro, 2015).

Desta forma, Pinotti e Carneiro (2015) ressaltam que os agentes de mobilização e resistência que atuam no escorregamento em cunha devem ser analisados com maiores critérios em relação aos implicados em escorregamentos planares, haja vista que, se os planos de inclinação forem diferentes, a força que atua em cada um ocorrerá de forma diferente.

A ruptura de uma encosta requer a presença de uma ação externa, cujo efeito é aumentar as tensões desestabilizadoras ou reduzir a resistência do solo (Corominas, 2006). Os processos são desencadeados por uma complexa relação entre uma série de condições exclusivas, como os elementos do meio físico ou biótico que agem diretamente na resistência do solo ou da rocha, contribuindo para a sua deflagração (Guidicini; Nieble, 1984; Selby, 1993; Fernandes; Amaral, 1996; Cruden;

Varnes, 1996; Fernandes *et al.* 2001; IPT, 2007; Tominaga, 2007; Tominaga *et al.* 2012; Pinto *et al.* 2013; Hungr *et al.* 2014; Cruden; Lan, 2015).

Os condicionantes naturais foram classificados como agentes predisponentes e efetivos preparatórios e imediatos, ou seja, as causas e os agentes (Quadro 02) (Guidicini; Nieble, 1984; Tominaga, 2007).

Os agentes predisponentes são aqueles que trazem junto de si características inerentes ao terreno no qual ocorrerá a deflagração do movimento, porém sem a interferência da ação humana. Tratam-se, portanto, de condicionantes geológicos/geotécnicos, tais como, parâmetros litológicos e estruturais, bem como, geomorfológicos: elevação, declividade, forma da encosta (perfil e planta), aspecto ou orientação das encostas, espessura do solo, comprimento da encosta, perfil assimétrico dos vales, área de contribuição de uma bacia e hidrologia, entre outros (Selby, 1993; Fernandes; Amaral, 1996; Fernandes *et al.* 2001; IPT, 2007; Tominaga, 2007, Tominaga *et al.* 2012; Hungr *et al.* 2014; CPRM, 2018).

Os agentes efetivos preparatórios e imediatos são aqueles que de fato agem na instabilidade da encosta e na deflagração do movimento, dividindo-se em naturais e/ou antrópicos. Dos fatores naturais, destacam-se: chuvas intensas, rápido degelo, elevação no nível d'água, vulcanismos, tectonismos e mudanças na geometria da encosta (Selby, 1993; Fernandes; Amaral, 1996; Fernandes *et al.* 2001; IPT, 2007; Tominaga, 2007, Tominaga *et al.* 2012; Hungr *et al.* 2014; CPRM, 2018).

A forma das vertentes e seu ângulo, a vegetação, o uso e ocupação/cobertura do solo promovidos pelas ações antrópicas são fatores condicionantes para o seu surgimento (Fernandes; Amaral, 2003; Amaral Junior, 2007; IPT, 2007; Passarela *et al.*, 2008; CPRM, 2018). Em alguns casos, o material mobilizado é produzido pelos próprios moradores, tais como, lixo e entulho de tamanhos variados (Carvalho *et al.* 2007; IPT, 2007).

Quadro 2 - Agentes, causas e processos relacionados a escorregamentos de terra

AGENTES E CAUSAS (DISTINÇÃO E SUBDIVISÃO)			
Agentes	Predisponentes	Complexo geológico, complexo morfológico, complexo climático-hidrológico, gravidade, calor solar, tipo de vegetação original.	
	Efetivos	Preparatórios	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação de nível de lagos e marés e do lençol freático, ação de animais e humana, inclusive desmatamentos.
		Imediatos	Chuvas intensas, fusão do gelo e neve, erosão, terremotos, ondas, vento, ação do homem.
Causas	Internas	Efeitos das oscilações térmicas; Redução dos parâmetros de resistência por intemperismo.	
	Externas	Efeitos das oscilações térmicas; Redução dos parâmetros de resistência por intemperismo.	
	Intermediárias	Aumento do nível piezométrico em massas coesas; Elevação da coluna da água em discontinuidades; Rebaixamento rápido do lençol freático; Erosão subterrânea retrogressiva (piping); Diminuição do efeito de coesão aparente.	

Fonte: Guidicini e Nieble (1984).

Segundo Selby (1993), um único fator raramente atua na deflagração de um escorregamento, portanto, eles ocorrem a partir de uma combinação de fatores condicionantes (que afetam o processo) e gatilhos (que os ativam) e, conforme cada situação, o mesmo fator pode atuar como condicionante ou desencadeador. No Sudeste Brasileiro, o principal agente deflagrador é a chuva, onde a precipitação fará

com que ocorra uma modificação na umidade dentro do perfil do solo, das poropressões relativas a este e dentro das rochas (Selby, 1993; Fernandes; Amaral, 1996).

Normalmente, os traços de instabilidade do terreno e o possível desencadeamento do processo podem ser observados pelo surgimento de fendas nas casas, por degraus de abatimento no relevo, pelo aumento de trincas já existentes, ocorridas pelo abaulamento em muros de arrimos, pela inclinação em objetos estáveis, como postes, muros, árvores, entre outros. Sob essas condições, a ocorrência de escorregamentos induzidos (Figura 3) é resultado da ocupação inadequada, e, neste sentido, são mais comuns em zonas com moradias precárias de baixa renda (IPT, 2007).

Figura 3 - Escorregamento rotacional (linhas vermelhas) em cortes artificiais (retaludamento) em terreno para construção de vias de acesso (linhas escuras) a uma empresa na cidade de Santo André – SP



Fonte: O Autor (2022).

As intervenções humanas nas encostas podem ser documentadas por meio de mapas e de fotografias aéreas e por registros de construção e escavação, sendo

útil para fins administrativos e em avaliações de perigos e riscos (IPT, 2007; Cruden; Lan, 2015). Assim, a identificação de escorregamentos induzidos artificialmente deve ocorrer de forma separada dos demais processos (IPT, 2007; Cruden; Lan, 2015).

2.1.1 Histórico de escorregamentos na Região Metropolitana de São Paulo

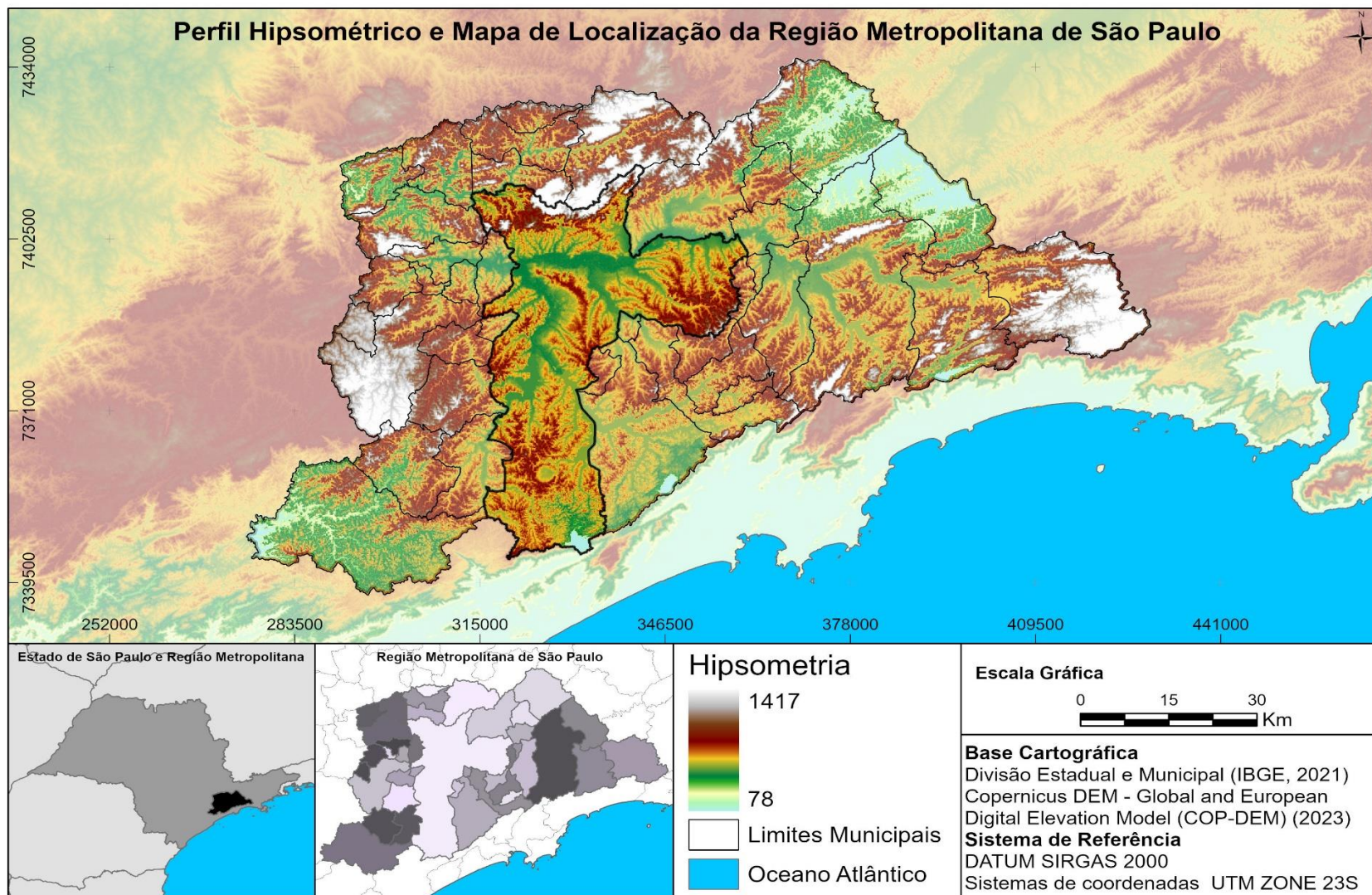
Instituída em 1973 e reorganizada em 2011 com a promulgação da Lei Complementar (LC) nº: 1.139/11, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) constitui-se em um dos principais aglomerados urbanos da América do Sul e o terceiro maior do mundo (Nobre; Young, 2011; Bouerl *et al.* 2013). Segundo Rodriguez (1998), a RMSP (Figura 4) caracteriza-se como o maior conglomerado urbano do hemisfério sul onde a maioria das pessoas residem a uma altitude entre 700 m e 850 m acima do nível do mar.

Com cerca de 7.946,96 km², a Região Metropolitana de São Paulo é constituída por 39 municípios dos quais 38 integram-se à cidade de São Paulo (Nobre; Young, 2011). Seu relevo possui altitudes que variam entre 730 m e 1200 m, composta, especificamente de colinas declivosas e fundos de vales com adensamento populacional avançado, cuja ocorrência de processos geodinâmicos (ex. inundações e escorregamentos) é comum.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2022), a população total da RMSP era estimada em mais de 21,9 milhões de habitantes, portanto, mais de 47% da população total do Estado. Entre os nove municípios do Estado de São Paulo com mais de 500 mil habitantes, cinco localizam-se na RMSP: São Paulo, Guarulhos, São Bernardo do Campo, Santo André e Osasco (Nobre; Young, 2011; Bouerl *et al.* 2013; IBGE, 2022).

Em consequência do crescimento acelerado de suas cidades e das ocupações, a expansão urbana ocorrida na RMSP se caracterizou com loteamentos irregulares instalados nas bordas urbanas, materializando áreas periféricas associadas à ocupação de terrenos geotecnicamente mais suscetíveis a escorregamentos (Nobre; Young, 2011). Neste contexto, IPT (2017) acrescenta que duzentas e duas pessoas vieram à óbito em virtude de escorregamentos de terra na Grande São Paulo no período de 1997 e 2017.

Figura 4 - Perfil Hipsométrico e mapa de localização da Região Metropolitana de São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados IBGE (2022), Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).

A RMSP comporta alguns dos locais com maiores incidências a escorregamentos de terra, a exemplo das cidades de São Bernardo do Campo, Mauá e Santo André no Grande ABC e outras como Embu das Artes, Francisco Morato, Franco da Rocha e Mairiporã assim como o município de São Paulo.

As cidades acima citadas foram palcos de eventos geodinâmicos em diferentes datas. No ano de 1999, um desmoronamento ocorrido na Rua da Bica – Vila São Pedro – São Bernardo do Campo causou diversos danos e pelo menos três vítimas fatais após fortes chuvas que assolaram a região; em 2005 pela mesma razão, ocorreu a deflagração de um escorregamento de terra no bairro Jardim Silvina na mesma cidade, deixando um rastro de destruição e vítimas fatais (Jornal Folha de São Paulo, 2005).

Em 2016, uma forte chuva deflagrou escorregamentos na cidade de Mairiporã ocasionando um total de 133 imóveis interditados, 09 famílias desabrigadas e 532 pessoas desalojadas; a chuva também atingiu municípios vizinhos (Agência Mural, 2016). Em 2019, novas ocorrências foram registradas na Vila São Pedro – São Bernardo do Campo, porém sem vítimas, o que levou a construção de obras de contenção de encostas no local por parte do poder público (Jornal Folha de São Paulo, 2019).

Em 2019, a Defesa Civil interditou 40 casas no bairro Jardim Zaíra em Mauá após a deflagração de dois escorregamentos de terra em um período de 24 horas, gerando destruição e vítimas fatais (G1, 2019). Em 2022, a Defesa Civil de Santo André, em ação conjunta com diversas secretarias municipais, interditou 191 imóveis em zonas com alto potencial de escorregamento de terra (ABCDOABC, 2022).

Durante grandes eventos pluviométricos que atingiram a RMSP no início de 2022, cidades como Francisco Morato, Franco da Rocha e Embu das Artes registraram diversos pontos de escorregamentos de terra. Somente na cidade de Franco da Rocha, um escorregamento de terra de grandes proporções ocorreu na Rua São Carlos (Figura 5), com registro de 18 vítimas fatais e muitos desabrigados (Estadão, 2022).

Figura 5 - Cicatriz de escorregamento de terra ocorrido no Bairro Parque Paulista - Franco da Rocha – RMSP. A linha amarela indica o ponto de ruptura



Fonte: O Autor (2022).

Sob esse cenário, o planejamento acelerado e excludente elevou os índices de vulnerabilidade social, configurando a maneira com a qual as encostas e fundos de vale e margens de rios foram irregularmente ocupados, fazendo com que a RMSP apresentasse um número elevado de áreas de risco a inundações e escorregamentos (Nobre; Young, 2011; Bouerl *et al.* 2013).

2.1.2 Cartas de perigo e conceitos relacionados

Estudos e zoneamentos de áreas expostas ao perigo a escorregamentos de terra, estão se tornando metodologias cujos objetivos enfatizam todos os eventos que sejam capazes de afetar uma área de estudo, considerando os resultados de mapeamentos de suscetibilidade (Pimentel *et. al.* 2018). Em contrapartida, abrangem a representação cartográfica dos tipos de movimentos que já ocorreram ou que podem

vir a ocorrer em termos de área, volume, espacialidade e alcance (Pimentel *et. al.* 2018).

A década de 1980 foi primordial para a consolidação dos conceitos de risco, perigo e vulnerabilidade (Faria, 2011). A série de estudos da UNDRO – *Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator* (Escritório do Coordenador de Assistência a Desastres das Nações Unidas) de conhecimento atual sobre Prevenção e Mitigação de Desastres usa os termos risco de desastres e probabilidade de dano, e define vulnerabilidade como o produto dos valores desses dois termos (UNDRO, 1979).

A problemática recorrente quanto às definições relacionadas aos conceitos de risco (*risk*), perigo (*hazard*), suscetibilidade e vulnerabilidade, na literatura, é extensa e por vezes utilizada de maneira incorreta. Marandola e Hogan (2004) relatam que, para o conceito *Hazard*, não há uma palavra sinônima na língua portuguesa que reporte o seu real significado, gerando complicações quanto às traduções e usos destes conceitos. No entanto, para Marcelino (2008), o termo perigo é aquele que mais se correlaciona com *Hazard* desde que represente qualquer condição ou fenômeno que possa causar consequências desagradáveis às pessoas ou danos a infraestruturas.

Para a UNDRO (1979), o perigo (*hazard*) significa a probabilidade de ocorrência, dentro de um determinado período em uma determinada área, de um fenômeno natural potencialmente danoso. A vulnerabilidade é o grau de perda de um determinado elemento em risco, sendo que cada elemento em risco possui um grau de vulnerabilidade distinto; cujos elementos em risco são a população, serviços públicos, utilidades e infraestrutura de uma determinada área (UNDRO, 1979). O risco específico é o grau esperado de perda devido a um fenômeno natural específico e em função tanto do perigo natural quanto da vulnerabilidade (UNDRO, 1979).

Conforme Mizutori e Guha-Sapir (2017), o termo *Hazard* refere-se a um evento que possui equivalência na natureza física a um fenômeno ou relacionado às atividades antrópicas com potencialidade para causar ferimentos e mortes, bem como a desestruturação social, econômica, ambiental e consequências danosas às propriedades.

O termo *hazard* pode ser entendido como ameaça ou perigo, quando traduzido de forma literal do inglês (Marcelino, 2008). No Brasil, em diversos estudos científicos nas áreas geológicas, geomorfológicas e geotécnicas, o termo não possui

entendimento comum entre os pesquisadores, podendo ser entendido como perigo, ameaça, suscetibilidade, ou mesmo como risco (Marcelino, 2008).

Neste sentido, perigos naturais (*natural hazards*) são processos ou eventos naturais que se manifestam na biosfera, podendo constituir um evento danoso e serem alterados pela atividade humana, tais como, a degradação do ambiente e a urbanização (Kobiyama *et al.* 2006).

Os riscos de desastres abrangendo os perigos naturais têm como fator inicial a vulnerabilidade social abarcando as comunidades carentes, com baixa capacidade das estruturas socioeconômicas de resistir e recuperar-se dos impactos (Ayala, 2002). Portanto, os perigos podem ser únicos, sequenciais ou combinados em sua origem e efeitos e cada perigo é definido pela sua localização, intensidade, frequência e probabilidade (Tominaga *et al.*, 2004).

Os perigos são representados como a probabilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente danoso dentro de uma determinada área e em um determinado período e a resposta aos perigos está relacionada tanto com a percepção dos fenômenos em si quanto com a consciência de oportunidades para fazer ajustes (Burton; Kates; White 1978, 1993; Varnes, 1984; Tominaga *et al.*, 2004). Conquanto, eventos geodinâmicos que não apresentem gravidade às atividades humanas não podem ser apontados como *Hazards* (Mattedi; Butzke, 2001).

Para Dang *et al.* (2018), desenvolver métodos alternativos e ferramentas eficientes, que de certa forma auxiliem no reconhecimento de áreas suscetíveis a escorregamentos, é um fator essencial para que as entidades governamentais avancem na tomada de decisões no sentido de prevenir e mitigar os danos por eventos geodinâmicos.

A especificidade dos fatos e a generalização das informações como a avaliação temporal do desempenho, as consequências do falhamento, incluindo os impactos ambientais e os aspectos econômicos, são fatores necessários para a avaliação de perigo (Aleotti; Chowdhury, 1999).

Deve-se levar em consideração se a avaliação será qualitativa ou quantitativa e se a base desta avaliação deve ser determinística ou probabilística na investigação dos registros de eventos históricos de instabilidade no sentido de até onde eles podem ser confiáveis, observando até onde a vulnerabilidade dos elementos em risco e o

impacto dos escorregamentos de terra terão que ser considerados (Aleotti; Chowdhury, 1999).

Os métodos qualitativos e quantitativos são os mais utilizados para avaliar a ocorrência de eventos perigosos, incluindo os escorregamentos de terra ((Aleotti; Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999). Essa metodologia necessitará da flexibilidade de tempo, da existência de dados e se estes estarão disponíveis, da extensão da área a ser estudada e, o mais importante, dos recursos financeiros que serão empreendidos para a sua realização (Ahrendt, 2009).

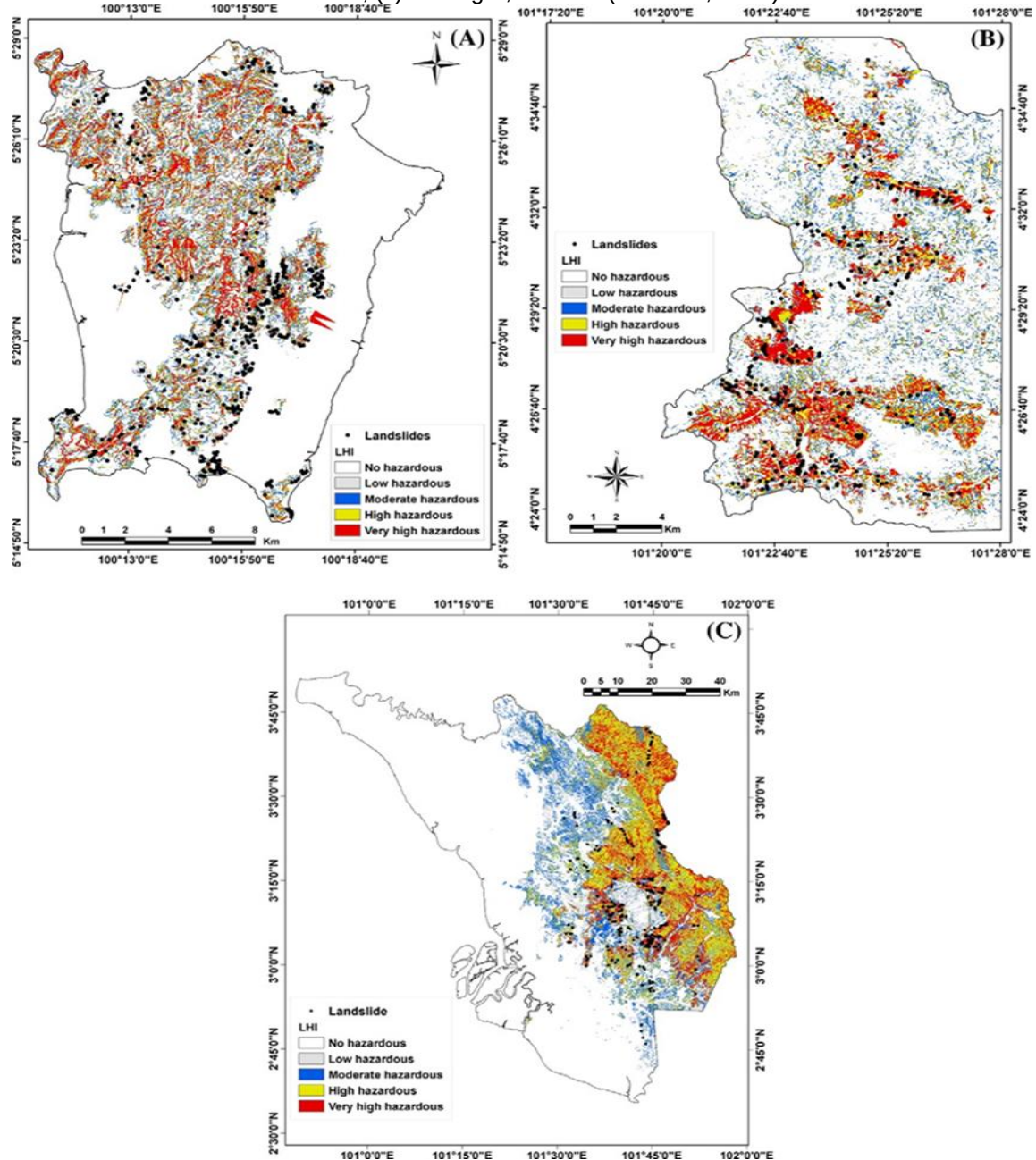
As abordagens qualitativas surgem da análise e julgamento do ou dos profissionais responsáveis para mapear e avaliar a suscetibilidade ou perigo. É comum que, para a obtenção e entradas de dados, sejam realizados trabalhos de campo na área a ser estudada e foteointerpretação de imagens aéreas, imagens de satélites e, atualmente, a utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) (Soeters; Van Westen, 1996; Aleotti; Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.* 1999; Barella, 2016).

Na abordagem quantitativa, os fenômenos são descritos e analisados a partir de dados numéricos, cuja avaliação do perigo é realizada utilizando-se modelos matemáticos (Aleotti; Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.* 1999). Essa metodologia, de acordo com Aleotti e Chowndhury (1999), é feita por meio das análises estatísticas e geotécnicas, sendo um dos exemplos, as Redes Neurais Artificiais (RNA). Os resultados obtidos a partir dessas abordagens dão origem a um mapeamento qualitativo e quantitativo de áreas de perigo.

Pradhan (2010) elaborou uma carta de perigo em três regiões da Malásia (Penang, Cameron, Selangor) utilizando o método de regressão logística multivariada. Os parâmetros utilizados foram a declividade, aspecto, curvatura, distância da drenagem, geologia, distância de lineamentos, pedologia, uso e ocupação de solo, precipitação e vegetação. O autor formulou um banco de dados a partir da detecção dos locais de escorregamentos e, após a execução dos cálculos e extração dos coeficientes de cada variável, estes foram convertidos em uma grade 10 x 10 m em ambiente SIG. O resultado da aplicação do modelo de regressão logística multivariada, aplicação cruzada e análise estatística foi a determinação dos coeficientes para as camadas de entrada e a produção de um conjunto de mapas de eventos perigosos nas três áreas de estudos, cujas principais conclusões foram que

os coeficientes de regressão logística, validados pela Curva ROC, obtiveram resultados entre muito bom e excelente, onde o caso de Selangor mostrou a maior acurácia (94%), Cameron (90%) e Penang (86%). (Figura 6).

Figura 6 - Carta de eventos perigosos utilizando coeficientes de regressão logística: (a) Penang, (b) Cameron, (c) Selangor, Malásia (Pradhan, 2010)



Fonte: Pradhan (2010).

2.2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)

Redes neurais artificiais (RNAs) são ferramentas computacionais avançadas que têm encontrado ampla utilização em diversas disciplinas na modelagem e resolução de muitos problemas complexos do mundo real (Basheer; Hajmeer, 2018).

As redes neurais imitam o cérebro humano construindo neurônios artificiais (nós) armazenando conhecimento na conexão destes neurônios, que são inseridos em uma estrutura paralela, altamente interconectadas, que processam informações por meio de respostas dinâmicas em sentido aos estímulos externos (Haykin, 2001). Este algoritmo é denominado algoritmo de aprendizagem e foram desenvolvidos com o intuito de criar um modelo para resolver problemas complexos (Haykin, 2001; Turban *et al.* 2005).

As unidades artificiais das redes (neurônios) são interligadas por sinapses artificiais associadas a pesos (simbolizadas por uma matriz de números) que armazenam conhecimento adquirido pela rede e podem ser ajustados por um processo de aprendizagem (Haykin, 2001).

Os relatos pioneiros sobre as Redes Neurais Artificiais (RNAs) apareceram no início da década de 1940 quando o neurofisiologista Warren S. McCulloch e o matemático Walter Pitts publicaram o artigo “*A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*” (Um cálculo lógico das ideias imanentes na atividade nervosa), estabelecendo as bases da neuro computação (Kasabov, 1998; Haykin, 2001; Kriesel, 2005). Em 1949, Donald Hebb publica o livro “*The Organization of Behavior*” (A organização do comportamento), onde destaca, pela primeira vez, a relevância das conexões entre as sinapses para a concepção da aprendizagem (Kasabov, 1998; Haykin, 2001; Kriesel, 2005).

Baseando-se no ideário de McCulloch e Pitts (1943) e Donald Hebb (1949), Rosenblatt (1958) projetou o primeiro modelo de uma rede neural artificial implementado em hardware, intitulado “*Perceptron*”, cujo experimento buscou a modelagem de fenômenos relativos ao sistema e a percepções visuais, sendo um método inovador de aprendizagem supervisionada (Kasabov, 1998; Haykin, 2001; Kriesel, 2005).

Na década de 1960, Widrow e Hoff desenvolveram uma fórmula capaz de calcular o erro de saída durante a fase de treinamento sendo uma regra de

aprendizado com a implantação de um algoritmo do mínimo quadrado médio ou regra delta, que resultou na formulação do Adaline (*Adaptive Linear Element* - elemento linear adaptativo). Posteriormente, em 1962, surgiu o módulo “*Madaline*” (elemento linear adaptativo múltiplo) (Kasabov, 1998; Haykin, 2001; Kriesel, 2005). O *Madaline* foi a proposta de Widrow para um modelo de redes neurais com camadas treináveis com múltiplos elementos adaptativos (Kasabov, 1998; Haykin, 2001; Kriesel, 2005).

As limitações teóricas do *Perceptron* de camada única foram expostas por Minsky e Peper em 1969, ocasionando o abandono das redes neurais por parte de outros pesquisadores, desencorajando-os a trabalhar com perceptrons e tampouco as agências a apoiar trabalhos sobre eles (Kasabov, 1998; Haykin, 2001; Kriesel, 2005).

Posteriormente, novos modelos conexionistas foram implementados como as memórias associativas de Hopfield (1982), o algoritmo *backpropagation* o algoritmo *backpropagation* (Rumelhart et al. 1986) ou algoritmo de retropropagação do erro, permitindo que o campo das redes neurais lentamente mostrasse sinais de ascensão (Kasabov, 1998; Haykin, 2001; Kriesel, 2005).

Estes modelos podem ser apontados conforme uma representação simplificada, que facilitará na interpretação da realidade por meio de objetos e processos, viabilizando a realização de simulações (Lopes, 2006).

Assim como ocorre em outros modelos, as redes neurais artificiais possuem certas limitações. Portanto, é importante destacar que um modelo de rede neural que utiliza o princípio da retropropagação, utiliza o regime de **caixa preta**, ou seja, a partir do momento em que os dados são inseridos e iniciada a execução, não se sabe ao certo o que ocorre e nem como a rede chega ao resultado de saída, já que seu conhecimento é representado como uma matriz numérica incompreensível ao entendimento humano.

Outra limitação observada é a lentidão quanto ao tempo de processamento para treinamento utilizando a retropropagação. Com a inserção dos 16 parâmetros foram criadas 32 RNAs e, utilizando a configuração proposta de 200 épocas para treinar um conjunto de RNAs e escolher a de maior representatividade, foram necessárias aproximadamente duas horas e quarenta minutos para a realização de todas as etapas com o auxílio de um computador particular cuja configuração é um *Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40 GHz* 8 núcleos, 12 Gbs de memória RAM e

Sistema Operacional de 64 bits, processador baseado em x64 e Placa Gráfica *NVIDIA GeForce GT 710*.

Neste sentido, como destacado por Nourani *et al.* (2013), a quantidade de entradas e neurônios ocultos ocorrem por meio de um demorado processo de tentativa e erro.

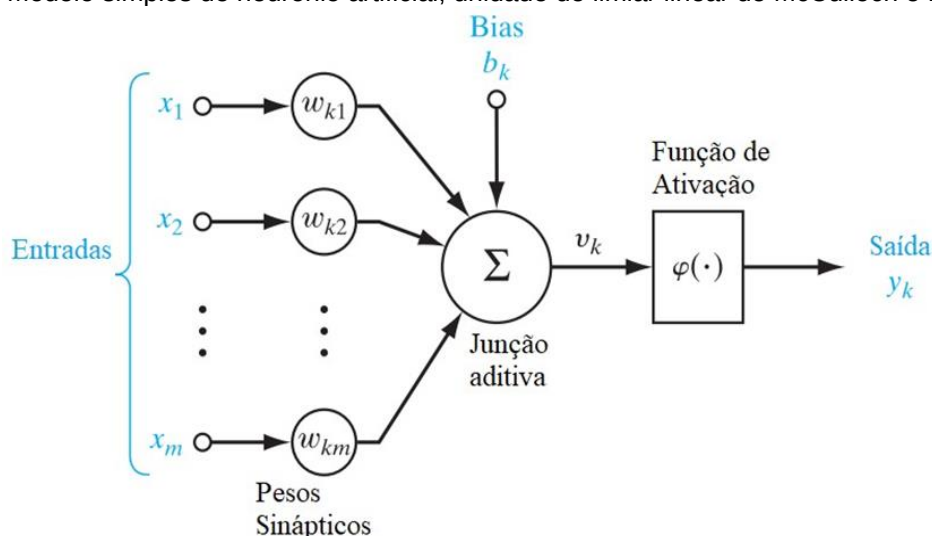
2.2.1 Principais modelos de RNAs, arquiteturas e estruturas internas e modelagens em RNA

Uma rede neural artificial é um mecanismo computacional capaz de adquirir, representar e computar um mapeamento de um espaço multivariado de informação para outro, dado um conjunto de dados representando aquele mapeamento (Paola; Schowengerdt, 1995).

Os benefícios oferecidos pela utilização das redes neurais artificiais são apontados por Haykin (2001) como a não-linearidade, o mapeamento de entrada e saída, a adaptabilidade, sendo a capacidade que uma rede neural tem em adaptar os seus pesos sinápticos, a tolerância a falhas, onde, em casos de operações complexas, o seu desempenho não é totalmente prejudicado (Hewitson; Crane, 1994; Haykin, 2001).

O modelo de neurônio apresentado por McCulloch e Pitts (1943) e seus elementos básicos (Figura 7), apresenta a modificação dos estímulos em uma informação a partir da inserção dos sinais de entrada, dos pesos ponderados pelas sinapses, da somatória interna realizada do elemento principal (*bias*) e da amplitude

Figura 7 - Modelo simples de neurônio artificial, unidade de limiar linear de McCulloch e Pitts (1943)



Fonte: Adaptado de Haykin (2001).

restrita de saída, de acordo com sua função de ativação (Haykin, 2001).

O neurônio k pode ser descrito matematicamente pela Equação 01 e Equação 02.

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (\text{Equação 01})$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (\text{Equação 02})$$

Onde: $X_1, X_2, \dots, X_n$ são os sinais de entrada; $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}$ são os respectivos pesos sinápticos do neurônio k ; u_k corresponde a saída do combinador linear aos sinais de entrada; b_k corresponde à bias ou viés; $\varphi(\cdot)$ corresponde a função de ativação; e y_k corresponde ao sinal de saída do neurônio. A função de ativação objetiva a limitação da saída dentro de um intervalo de valores a serem assumidos, sendo a sua potencialização ou diminuição aplicada pelo bias b_k à saída u_k do marcador linear, conforme a Equação 03.

$$v_k = (u_k + b_k) \quad (\text{Equação 03})$$

Onde: conforme o valor do bias b_k for positivo ou negativo, a conexão entre o campo local induzido ou potencial de ativação v_k do neurônio k modificará a saída do combinador linear u_k .

As conexões entre as unidades de processamento são fisicamente representadas por pesos e cada neurônio tem uma regra para somar os pesos de entrada e uma regra para calcular um valor de saída. O modelo é completado por funções de transferência que permitem a comunicação entre camadas e a produção de um neurônio de saída.

A atribuição dos pesos, ou pesos sinápticos, é de suma relevância e sua função é representar uma regra para somar os pesos de entrada e uma regra para calcular um valor de saída (Ermini *et al.* 2005). Assim, o valor que um sinal de entrada exerce em detrimento a determinado neurônio e, quanto mais estímulos essa entrada receber, maior será a sua significância e influência quanto ao resultado na saída do neurônio (Ermini *et al.* 2005).

Neste sentido, de acordo com Haykin (2001), é possível considerar três aspectos que, em suma importância, caracterizam um neurônio artificial:

1. Os pesos aplicam características próprias a um grupo de sinapses; a função do peso w_{kj} é realizar a multiplicação do sinal x_j inserido na entrada da sinapse j que se encontra interligada ao neurônio k , porém é de suma relevância considerar a forma como a relação do peso sináptico w_{kj} estão apontados, haja vista a diferença entre os pesos relacionados: o primeiro mantém relação com o neurônio e no segundo a entrada da sinapse pertence ao referido peso.
2. As sinapses do neurônio ponderam as somas oriundas dos sinais de entrada, constituindo um marcador linear; para tanto, há um somador que realiza essa tarefa;
3. A existência de uma função de ativação de ativação que restringe a capacidade de saída de um neurônio, limitando-o. Esta função normaliza a capacidade de saída de um neurônio restringindo-o a um intervalo fechado e único $[0,1]$ ou, de modo alternativo $[-1, 1]$.

Esta forma de função de limiar é normalmente referida como função de Heaviside (Haykin, 2001). A saída do neurônio k que emprega esta função de limiar é expressa na Equação 4.

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_k \geq 0 \\ 0 & \text{se } v_k < 0 \end{cases} \quad (\text{Equação 04})$$

Onde: v_k é o campo potencial de ativação.

A função sigmoide em forma de S é comumente usada como função de transferência (Haykin, 2001; Lee *et. al*, 2003). Ela é, sem dúvida, a função mais usada na construção e ativação de redes neurais artificiais, possuindo caráter linear e não linear, ou seja, possui um comportamento balanceado, assumindo valores entre 0 e 1. A RNA implementada no **módulo r. landslide** utiliza a função de ativação sigmóide que representa um equilíbrio entre comportamento linear e não linear, e é representada pela Equação 05.

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha v)} \quad (\text{Equação 05})$$

Onde: onde α é o parâmetro de inclinação da função sigmóide. Variando-se o parâmetro α , obtêm-se funções sigmóides com diferentes inclinações. Enquanto a

função de limiar assume o valor de 0 ou 1, uma função sigmóide assume um intervalo contínuo de valores entre 0 e 1.

Desta forma, é possível considerar que uma RNA, por meio das informações aplicadas e pela introdução de dados, aprenda e generalize-as e que, ao final, produza, decerto, resultados com um certo nível de coerência para a saída destes dados que até então eram desconhecidos, sendo treinada pelo uso de um conjunto de exemplos de valores associados aos valores de entrada e saída (Lee *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2009; Pradhan; Lee, 2009).

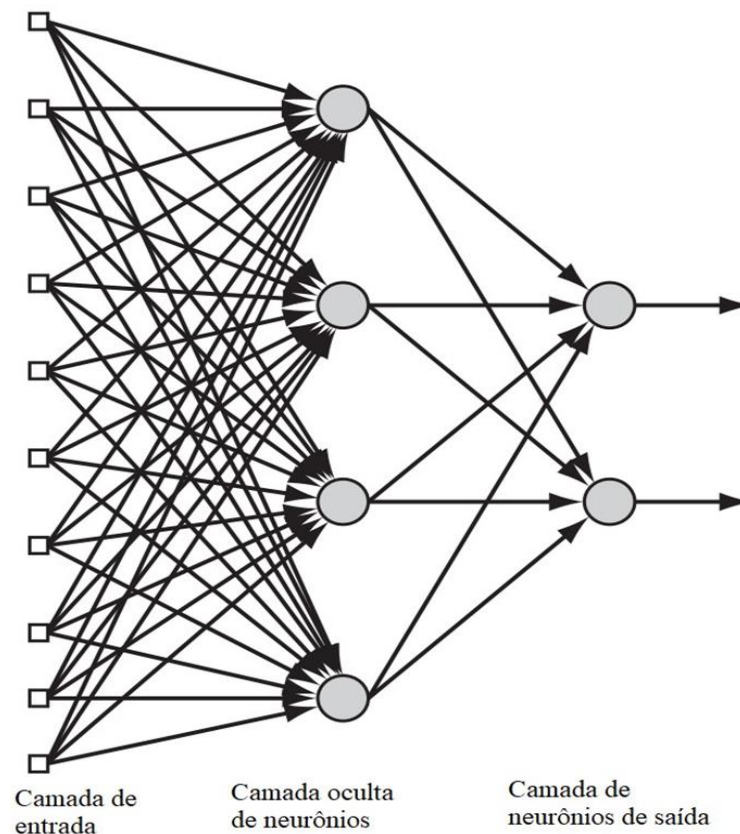
O primeiro algoritmo de retropropagação foi criado em 1986 por Rumelhart, Hilton e Williams que descreveram uma metodologia de treinamento, aprendizagem para redes ou unidades que se assemelhavam a neurônios, também conhecido como algoritmo de retropropagação e erro (Haykin, 2001).

De acordo com Cybenko (1989), BI *et al.* (2013), a retropropagação é um algoritmo de aprendizagem para treinamento e constitui uma camada de entrada, pode conter uma ou inúmeras camadas ocultas e uma camada de saída. As camadas ocultas e a de saída são responsáveis pelo processamento dos dados inseridos na camada de entrada, multiplicando pelos pesos correspondentes ajustando-os a fim minimizar o erro (Cybenko, 1989; BI *et al.*, 2013).

Na arquitetura da rede *Perceptron de Múltiplas Camadas* (Figura 8) são adicionadas algumas camadas de entrada onde os dados são inseridos, camadas ocultas onde ocorre o processamento destes dados, e a camada de saída, onde é apresentado o resultado da compilação destes dados (German; Gahegan, 1996; Lee *et al.*, 2003; Ermini *et al.* 2005; Pradhan; Lee, 2009; Choi *et al.* 2009). Desta forma, podemos destacar que a arquitetura de uma Rede Neural Artificial é o modo como os neurônios artificiais estão intercalados numa determinada estrutura lógica.

Adicionando uma ou mais camadas ocultas, permite-se que a rede possa lidar com a extração de dados estatísticos de ordem acima de sua entrada (Haykin, 2001). Em outras palavras, apesar de sua conectividade local, a rede adquire uma perspectiva global pela ação do conjunto extra de conexões sinápticas e à dimensão extra das interações neurais (Churchland; Sejnowsk, 1992; Haykin, 2001).

Figura 8 - Arquitetura da rede neural Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP) com uma camada oculta



Fonte: Adaptado de Haykin (2001).

Tais redes são caracterizadas pelas altas taxas de aplicações em diversos tipos de questões relacionadas a diferentes áreas do conhecimento. Sua arquitetura é considerada pela sua versatilidade e aplicabilidade em problemas de aproximação de funções, classificação de padrões, identificação e otimização de sistemas, otimização, robótica, em otimização de sistemas e identificação e controle de processos (Haykin, 2001; Silva *et al.*, 2010).

A publicação do livro *Parallel Distributed Processing* (McClelland *et al.* 1986) cuja sua funcionabilidade foi exposta e o algoritmo de aprendizagem *Backpropagation* foi apresentado, permitiu que este fosse implementado no processo de treinamento dessas redes (Churchland; Sejnowski, 1992; Haykin, 2001; Silva *et al.*, 2010).

A rede Perceptrons de Múltiplas Camadas tem sido constantemente utilizada em trabalhos dos mais variados temas, utilizando metodologia de treinamento supervisionado com o algoritmo de retropropagação de erro (*backpropagation*) (Haykin, 2001). Configuram soluções que geraram resultados satisfatórios em diversas pesquisas relacionadas a suscetibilidade a escorregamentos de terra (Lee *et*

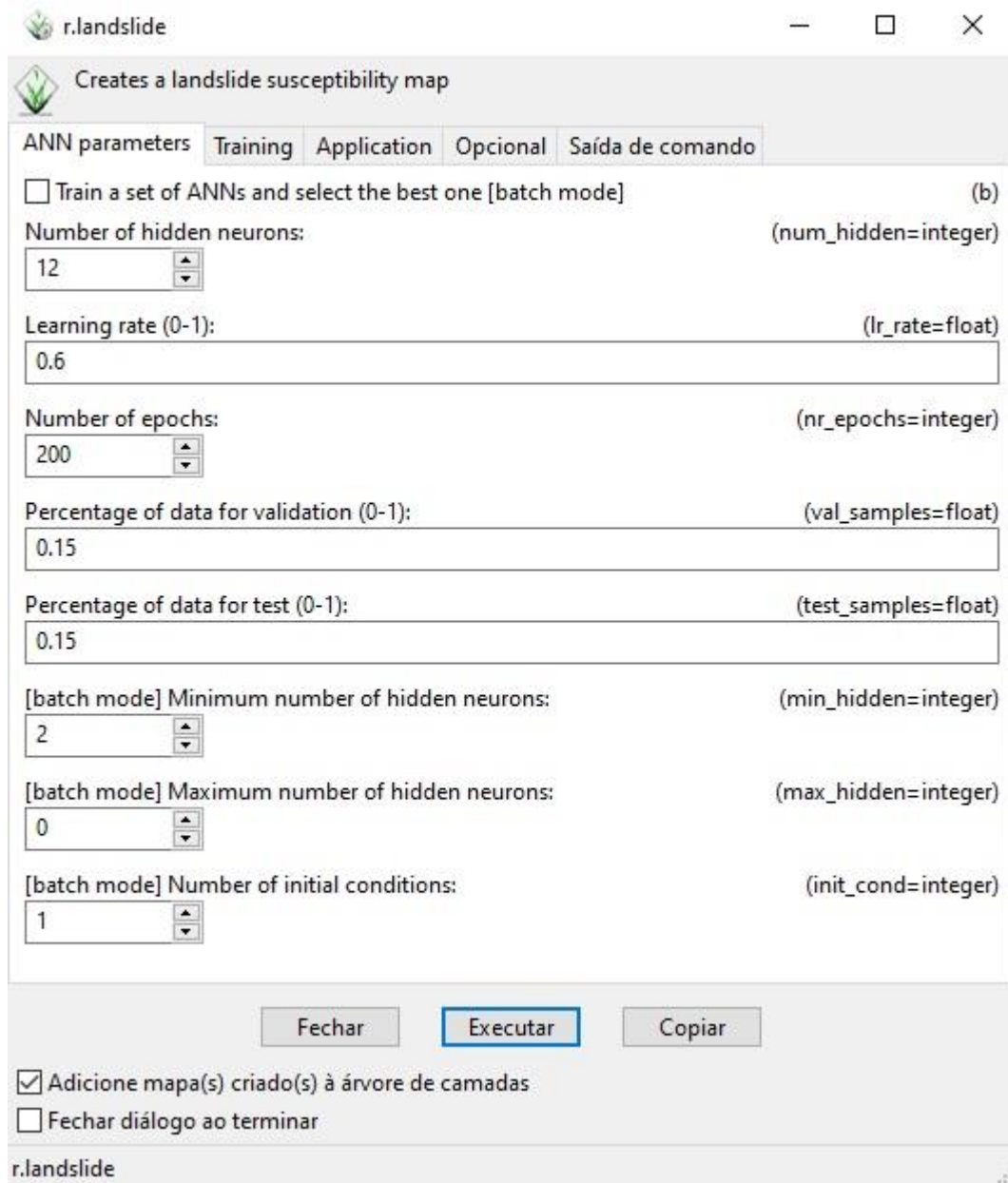
al. 2003, 2006, 2007; Ermini *et al.* 2005; Choi *et al.* 2009; Bi *et al.*, 2013; Bhardwaj; Venkatachalam, 2014; Park *et al.* 2013; Nourani, 2014; Polykretis; Chalkias, 2018; oliveira *et al.* 2019; Bragagnolo *et al.* 2019; Bragagnolo *et al.* 2020; Ozdemir, 2020, entre outros) bem como, na análise de perigo (Pradhan; Lee, 2009; Pradhan, 2010; Pardeshi *et al.* 2013).

Nestas circunstâncias, o desenvolvimento do **módulo *r. landslide*** (Bragagnolo *et al.* 2019) baseia-se no princípio do *perceptron* multicamadas com três camadas de neurônios, sendo elas: a camada de entrada que recebe os parâmetros morfológicos que serão aplicados no treinamento, validação, teste e aplicação da RNA; a camada intermediária – onde ocorrem o processamento e as interações entre os parâmetros de entrada, mapeando-os da entrada para a saída – e a camada de saída que gera o resultado do processamento destas entradas (Bragagnolo *et al.* 2019).

O treinamento das redes neurais se faz por meio do algoritmo de retropropagação (Haykin, 1999; Bragagnolo *et al.* 2019). Os parâmetros internos do **módulo *r. landslide*** utilizados neste trabalho (Figura 09) são os mesmos valores especificados por Bragagnolo *et al.* (2019) e constitui-se em: 200 épocas de treinamento, taxa de aprendizado $\alpha=0.6$, número mínimo e máximo de neurônios na camada oculta iguais a 2 e 12, respectivamente, e percentuais de registros nos conjuntos de treinamento, validação e teste, iguais a 70-15-15, nessa ordem.

A validação ocorre de forma síncrona a um conjunto de registros que não se fez necessário utilizar durante a fase de treinamento, servindo de bases para o processamento e término do treinamento, ou seja, a parada antecipada (Bragagnolo *et al.* 2019). Este procedimento cessa o processo de treino, salvando os parâmetros quando a função atinge um erro mínimo durante a validação, testando e aplicando uma análise de sensibilidade aos registros não vistos, visando identificar os parâmetros de maior influência na deflagração de escorregamentos de terra (Bragagnolo *et al.* 2019).

Figura 9 - Interface principal do módulo r. landslide. Nesta aba é possível escolher as quatro principais opções que são: parâmetros da RNA, treinamento, aplicação e opcional



The screenshot shows the 'r.landslide' window with the title 'Creates a landslide susceptibility map'. It features four tabs: 'ANN parameters' (selected), 'Training', 'Application', and 'Opcional', along with a 'Saída de comando' button. The 'ANN parameters' tab contains several input fields and checkboxes:

- ☐ Train a set of ANNs and select the best one [batch mode] (b)
- Number of hidden neurons: 12 (num_hidden=integer)
- Learning rate (0-1): 0.6 (lr_rate=float)
- Number of epochs: 200 (nr_epochs=integer)
- Percentage of data for validation (0-1): 0.15 (val_samples=float)
- Percentage of data for test (0-1): 0.15 (test_samples=float)
- [batch mode] Minimum number of hidden neurons: 2 (min_hidden=integer)
- [batch mode] Maximum number of hidden neurons: 0 (max_hidden=integer)
- [batch mode] Number of initial conditions: 1 (init_cond=integer)

At the bottom, there are three buttons: 'Fechar', 'Executar' (highlighted with a blue border), and 'Copiar'. Below these buttons are two checkboxes:

- ☒ Adicione mapa(s) criado(s) à árvore de camadas
- ☐ Fechar diálogo ao terminar

The window title bar at the bottom reads 'r.landslide'.

Fonte: Bragagnolo *et. al.* (2019).

2.2.2 Trabalhos desenvolvidos (RNAs)

Os artigos relacionados neste tópico são exemplos de como as Redes Neurais Artificiais são úteis na predição de perigo e suscetibilidade a escorregamentos de terra.

Lee *et al.* (2003) desenvolveram análises de suscetibilidade a escorregamentos de terra na cidade de Boun, Coréia do Sul. A partir da fotointerpretação de imagens aéreas, levantamento de campo e uso de banco de

dados espaciais, construíram diversos mapas em escalas variadas aplicando o método de retropropagação utilizando uma rede neural artificial para calcular os pesos inseridos entre as multicamadas existentes, o mapa de suscetibilidade gerado foi comparado com o resultado do mapa da área da cidade de Yongin, Coréia. O resultado da verificação entre o mapa de suscetibilidade e os dados de localização do escorregamento demonstraram que o SIG e a rede neural podem ser usados para produzir um índice eficaz de suscetibilidade a escorregamentos mesmo sendo difícil o acompanhamento dos processos internos do procedimento e do longo tempo de execução do método da rede neural, o que gera uma carga computacional pesada.

Pradhan e Lee (2009) analisaram o risco de suscetibilidade a escorregamentos usando um modelo de rede neural artificial para *Cameron Highland*, Malásia. A análise qualitativa da suscetibilidade a escorregamentos foi realizada utilizando um modelo de rede neural artificial, a partir da sobreposição de mapas em ambiente GIS. Os pesos foram calculados aplicando a rede neural artificial e o algoritmo de retropropagação no software *MATLAB 7.6*. O conjunto de fatores predisponentes utilizados foram os dados topográficos, estruturais, geológicos e outros extraídos em ambiente SIG como a curvatura, declividade etc. O mapa de inventário de escorregamentos foi criado com 324 pontos e, após feitas as análises, a declividade apresentou ser o parâmetro de maior relevância à ocorrência de escorregamentos, apresentando peso de 0,205, seguido pela distância de drenagem (0,141), litologia (0,117), curvatura (0,085), aspecto (0,079) e cobertura do solo (0,072), concluindo que o ângulo de inclinação dispostos entre 15° e 35° são mais propensos à ocorrência de escorregamentos. Para validação, os autores aplicaram o método de validação cruzada nos resultados obtidos, demonstrando que 83% dos pixels relativos aos escorregamentos de terra foram classificados com precisão, demonstrando ser a rede neural artificial e o algoritmo de retropropagação um modelo de considerável desempenho nos estudos relacionados a escorregamentos de terra.

Pradhan e Lee (2009) realizaram um estudo visando a identificação de perigo de escorregamento de terra na ilha de Penang, Malásia utilizando dados de sensoriamento remoto, ferramentas SIG e redes neurais artificiais. Os autores utilizaram alguns fatores como a litologia, declividade, geologia, clima, uso do solo e atividade antrópica que posteriormente foram processados em um banco de dados SIG. Os dados foram aplicados em uma rede neural artificial composta por três

camadas utilizando o algoritmo de retropropagação para treinamento e cálculo dos pesos entre a camada de entrada e a camada oculta, e entre a camada oculta e a camada de saída, modificando o número de nós ocultos e a taxa de aprendizado (Pradhan; Lee, 2009). A precisão de ocorrência obtida foi de 83,72,82,79 e 81%, respectivamente, provando ser a rede neural e o algoritmo de retropropagação eficazes para análise de perigo e risco a escorregamentos.

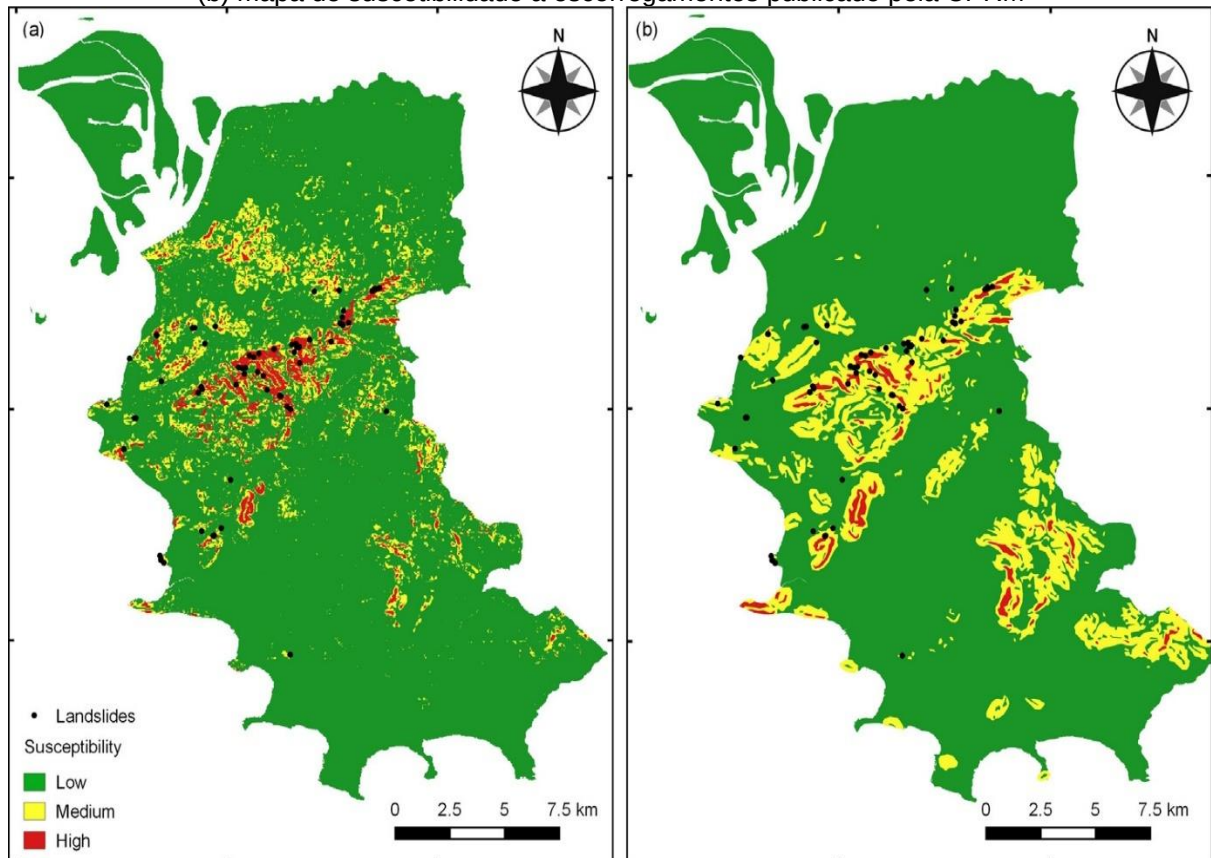
Gorsevski *et al.* (2015) realizaram um estudo de caso no Parque Cuyahoga Valley, Ohio (EUA) aplicando uma abordagem de rede neural artificial e método de retropropagação visando detectar ocorrências de escorregamentos de terra utilizando mapas originados a partir de modelos digitais de elevação (MDE) derivados de dados LiDAR. Para tanto, aplicaram os parâmetros radiação solar e índice de umidade, curvas de perfil e plano, área de drenagem ascendente e declividade sendo ambos extraídos em ambiente SIG. Após o treinamento e validação do modelo na área de estudo, o resultado demonstrou que, internamente, na classe de suscetibilidade muito alta, 42,6% do total de ocorrências estava associado a 1,56% da área total, contrastando com 82,68%, ou seja, 1,20% de escorregamentos na área total.

Quevedo *et al.* (2019) utilizaram uma RNA para a modelagem e mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Rolante, afluente do Rio Guaíba no Estado do Rio Grande do Sul. Os estudos foram divididos em diversas etapas como a criação do inventário de cicatrizes e a fase de treinamento e teste da rede neural utilizando o algoritmo de retropropagação. A função sigmoideal foi aplicada em todas as camadas e os pesos sinápticos foram atualizados pela Regra Delta; para uma maior acurácia, os resultados validados usando a curva ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) ou Curva Característica de Operação do Receptor. Os resultados obtidos demonstram que os atributos declividade, Fator LS, profundidade dos vales e elevação tiveram um índice maior de correlação a movimentos de massa, resultando em 0,57, 0,57, 0,52 e 0,49 respectivamente, comprovando que as redes neurais são eficazes na modelagem de áreas desde que se faça uma análise visual prévia dos resultados, a fim da escolha daqueles que apresentam uma melhor acurácia referente ao mapeamento relativo a movimentos de massa.

Bragagnolo *et al.* (2019) aplicaram o **módulo r. landslide** no município de Porto Alegre (Figura 10) para demonstrar o desempenho desta ferramenta e sua

eficácia na elaboração de mapas de suscetibilidade. O mapa gerado foi comparado com o de um importante órgão de pesquisa brasileiro e comparado diretamente utilizando novos registros, ou registros não vistos. Esta ação indicou que o **módulo *r. landslide*** foi eficaz ao obter uma melhor precisão na identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos de terra. Foram utilizados 119 registros de escorregamentos, dos quais 100 registros (50 escorregamentos e 50 não escorregamentos) foram aplicados para treinamento, validação e teste e os demais foram utilizados para avaliar o desempenho da RNA. Os autores reportam que os resultados obtidos através do **módulo *r. landslide*** indicam que as RNAs de fato apresentam desempenho superior, tendo alcançado AUC de 0,96.

Figura 10 - Mapas de suscetibilidade a escorregamentos: (a) mapa gerado pelo módulo *r. landslide* (b) mapa de suscetibilidade a escorregamentos publicado pela CPRM



Fonte: Bragagnolo *et al.* (2019).

3 A METRÓPOLE DE SÃO PAULO (RMSP), SEUS ASPECTOS FÍSICOS E ANTRÓPICOS

Situada no sudeste do Brasil, a cidade de São Paulo (Figura 11) é hoje a maior e uma das principais cidades do Brasil e da América do Sul. O conteúdo populacional, de acordo com o Censo de 2010 era de mais de 11 milhões de habitantes, no entanto, para o ano de 2021 a estimativa está em mais de 12 milhões de habitantes com densidade populacional de 7.398,26 por km² em um território de 1.521.202 km² (IBGE, 2021).

O início do processo de urbanização e metropolização da cidade de São Paulo data do final do século XIX e início do século XX. A cultura cafeeira era neste século a economia principal do Brasil e, no Estado de São Paulo destacavam-se as regiões de Campinas e do Vale do Paraíba do Sul. A localização geográfica e as características topográficas do planalto paulista e a distribuição dos seus sistemas hidrográficos foram agentes favoráveis à esta expansão (Meyer *et. al.*, 2015).

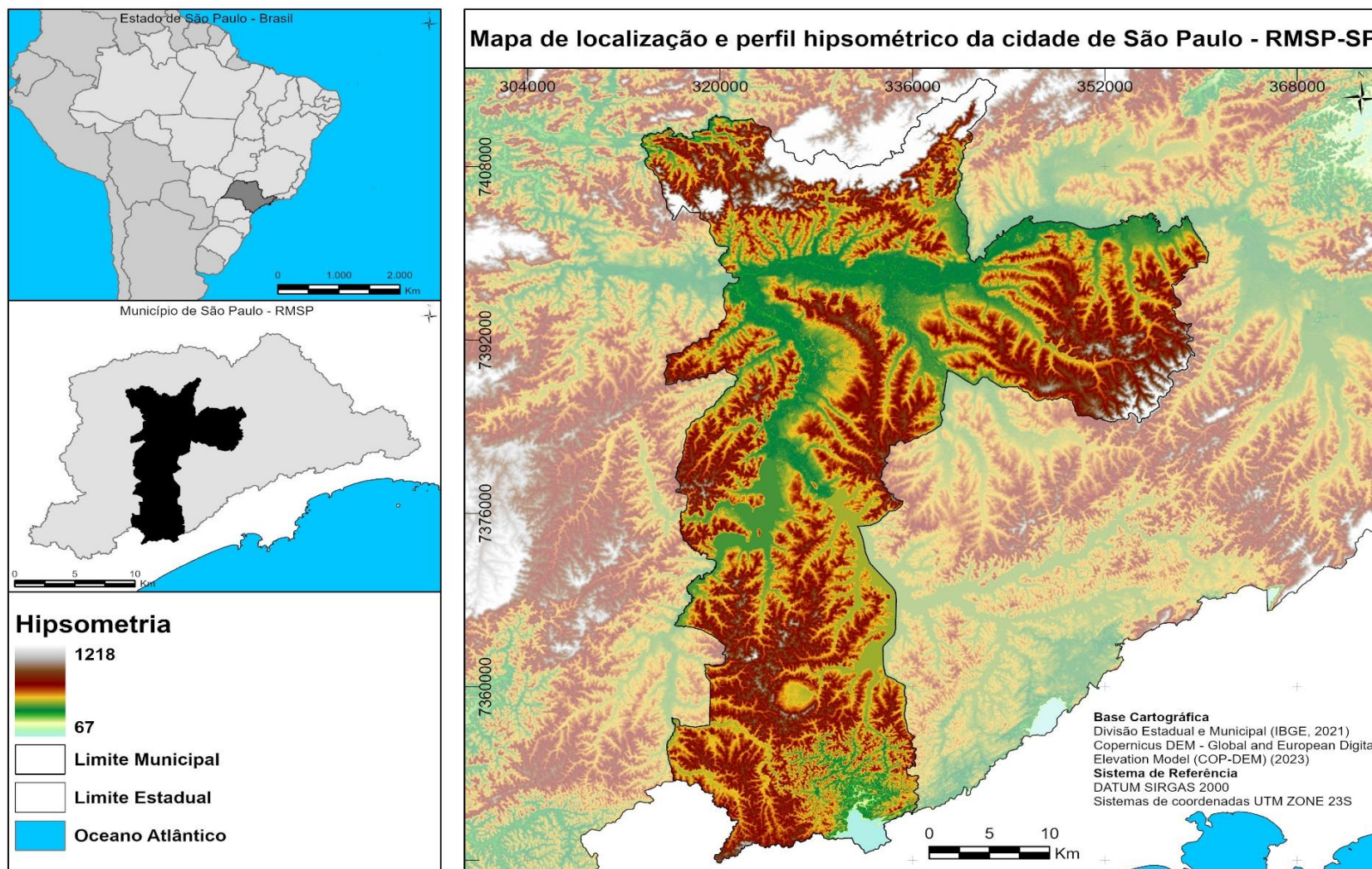
Nos anos 1867, as regiões produtoras do interior do Estado eram coligadas ao Porto de Santos através do sistema ferroviário da São Paulo Railway (Meyer *et. al.*, 2015). Assim, a expansão da cidade neste período se deu timidamente através dos trilhos das ferrovias e, a malha urbana foi segmentando-se pelos espaços inocupados equivalentes às planícies de inundação, vales encaixados ou áreas de cabeceiras (Moroz, 2010; Meyer *et. al.*, 2015).

Neste contexto, a cidade de São Paulo torna se um centro estratégico de toda a atividade comercial e a chegada dos trilhos e o movimento de imigração contribuíram para que a população adentrasse por espaços intraurbanos (Corrêa, 1989), intensificando a ocupação e, concomitante a este desenvolvimento, problemas de todas as sortes surgiram.

O adensamento populacional que se iniciou na década de 1920, consumou um aumento relativo na população da cidade, ultrapassando, à época, a população da capital do país, porém, foi na década de 1940 que a urbanização chegou ao seu auge quando as áreas dispostas ao longo das ferrovias foram sendo ocupadas.

O crescimento das áreas periféricas aumentou na década de 1980 mesmo com o retrocesso da taxa de crescimento populacional ocorrido na década de 1970, ocasionando um efeito de favelização gerando ocupações às margens de córregos e

Figura 11 - Mapa de localização e Perfil Hipsométrico da cidade de São Paulo - RMSP



Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados IBGE (2021), *Copernicus DEM - (COP-DEM)* (2023).

rios, em encostas com cotas acima de 45 graus dentre outras áreas de riscos. (Grostein, 2001).

Segundo Grostein (2001), o parcelamento e o uso e ocupação do solo são os atributos da atualidade que possuem uma maior relevância para o desenvolvimento de uma metrópole. Esta associação é determinada pelos inúmeros assentamentos e conjuntos habitacionais construídos para a população de baixa renda (Grostein, 2001).

No decorrer do século XX houve uma importante migração para a cidade de São Paulo, o que acarretou um incremento populacional e, entre outros problemas, a falta de moradia. Com a escassez de loteamentos legais ofertados e o aumento de loteamentos de caráter irregular em áreas de risco e próximos às áreas de mananciais (Grostein, 2001), ocasionando uma expansão urbana em direção aos compartimentos geológicos e geomorfológicos de grande expressividade, situações que se agravaram ainda mais nas décadas seguintes.

É importante destacar que a capital administrativa do Estado de São Paulo, hoje subdivide-se em 31 subprefeituras (Figura 12) e 96 distritos (Figura 13) - estes últimos como expressão territorial da menor unidade administrativa municipal - atuando como núcleo central da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (IBGE, 2001).

Em 2010, um mapeamento feito pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, sob supervisão da então Secretaria Municipal de Coordenação das Subprefeituras (SMCS -SP), diagnosticou 407 áreas de risco divididas em 1.183 setores de risco na cidade de São Paulo, porém, os dados mais recentes, mensurados entre os anos de 2016 e 2022, o diagnóstico foi de 481 áreas de risco e 1330 setores de risco na cidade de São Paulo (GEOSAMPA, 2022).

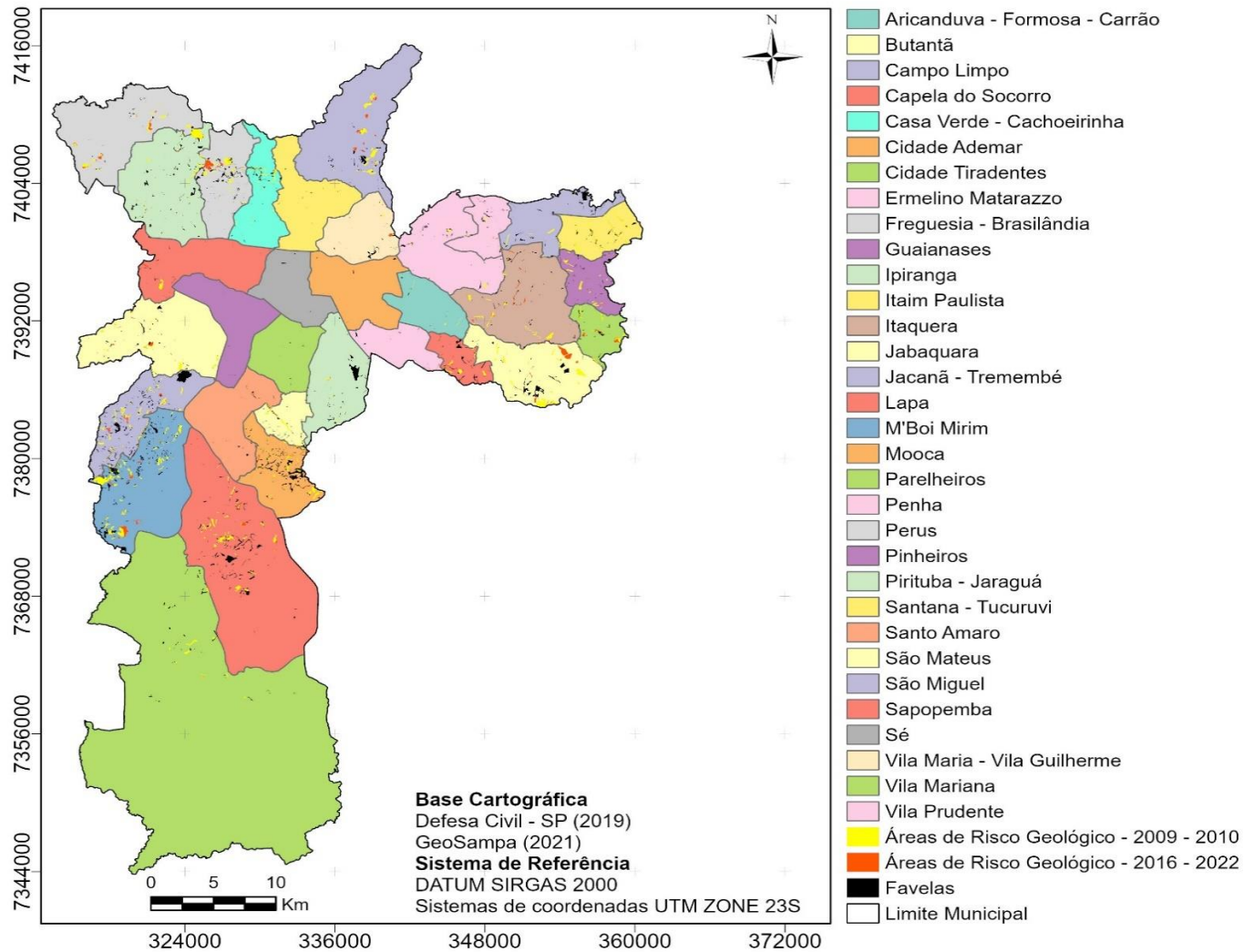
Os setores de risco, como demonstrados na figura 12, destacam-se, consideravelmente nas subprefeituras situadas nas extremidades da cidade de São Paulo, como as de Sapopemba, São Mateus, Cidade Tiradentes, Guaianases, Itaquera e Itaim Paulista na Zona Leste; nas subprefeituras de Jaçanã – Tremembé, Casa Verde – Cachoeirinha, Freguesia do Ó – Brasilândia, Perus e Pirituba – Jaraguá na Zona Norte, a do Butantã na Zona Oeste e as de Campo Limpo, Capela do Socorro, M'Boi Mirim e Cidade Ademar na Zona Sul da capital paulista.

Neste cenário, como demonstrado na figura 13, os distritos com maiores incidências de setores áreas de risco são os de Campo Limpo, Capão Redondo, Jardim Ângela, Jardim São Luís, Cidade Dutra, Grajaú (Figura 14) e Cidade Ademar na Zona Sul; Sapopemba, Parque São Rafael, Iguatemi, Cidade Tiradentes, Guaianases, Lajeado, Itaim Paulista e Parque do Carmo (Figura 15) na Zona Leste; nos distritos de Jaçanã (Figura 16), Tremembé, Cachoeirinha, Brasilândia e Perus na Zona Norte e em alguns distritos localizados na Zona Oeste como o de Jaguaré e Rio Pequeno.

Neste contexto nota-se um aumento significativo de setores de risco geológico e, conseqüentemente, uma quantidade expressiva de moradores e moradias sujeitos ao perigo de ocorrência de algum evento geodinâmico, como os escorregamentos de terra.

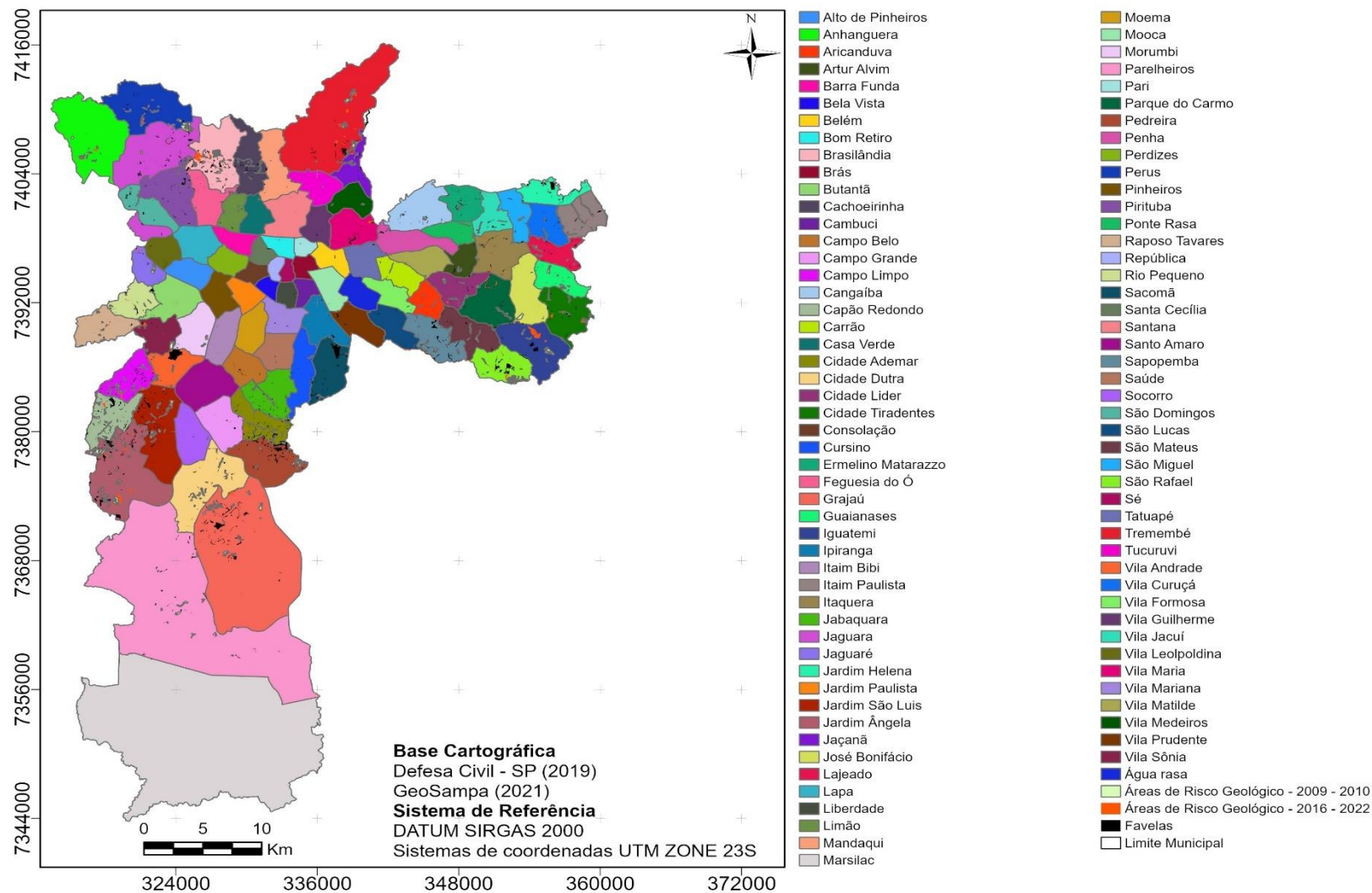
Figura 12 - Mapa de setorização de área de risco geológico e favelas por subprefeituras – São Paulo - RMSP

Setorização das Áreas de Risco Geológico e Favelas por Subprefeituras - São Paulo (RMSP)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados contidos no portal GeoSampa (2021).

Figura 13 - Mapa de áreas de risco geológico e favelas por distritos – São Paulo – RMSP
Setorização das Áreas de Risco Geológico e Favelas por Distritos - São Paulo (RMSP)



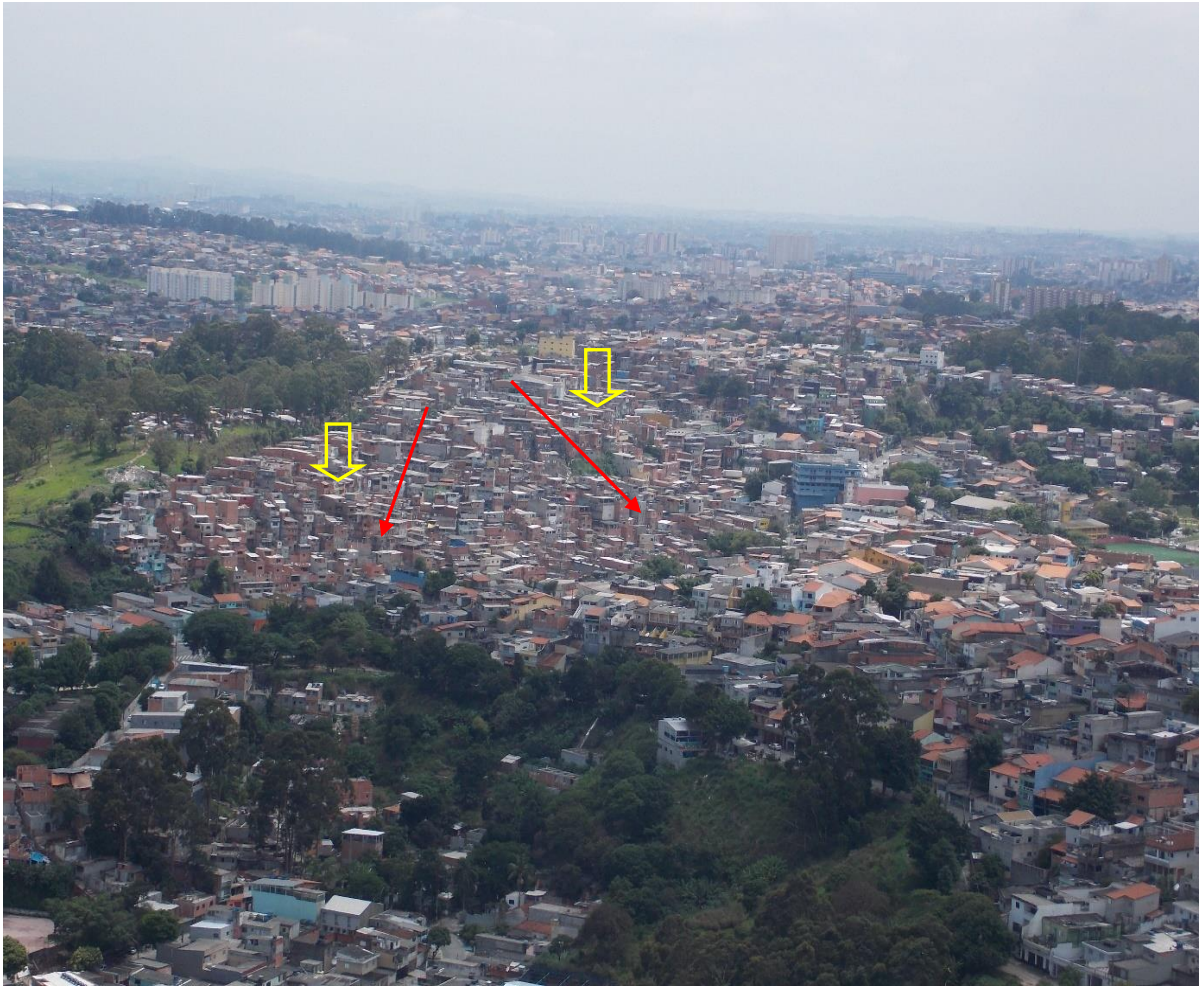
Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados contidos no portal GeoSampa (2021).

Figura 14 - Fotografia aérea oblíqua obtida em sobrevoo de helicóptero, cujas setas indicam as residências em situação de perigo a escorregamento de terra – Bairro do Grajaú - Zona Sul da cidade de São Paulo (SP)



Fonte: O Autor (2021).

Figura 15 - Fotografia aérea oblíqua obtida em sobrevoo de helicóptero, cujas setas indicam a presença de uma aglomeração urbana em encosta de alta declividade – Parque do Carmo -. Zona Leste da cidade de São Paulo (SP)



Fonte: O Autor (2021).

Figura 16 - Fotografia aérea oblíqua obtida em sobrevoo de helicóptero, cujas setas indicam as moradias em situação de perigo a escorregamento de terra – Jardim Hebron - Jaçanã - Zona Norte da cidade de São Paulo (SP)



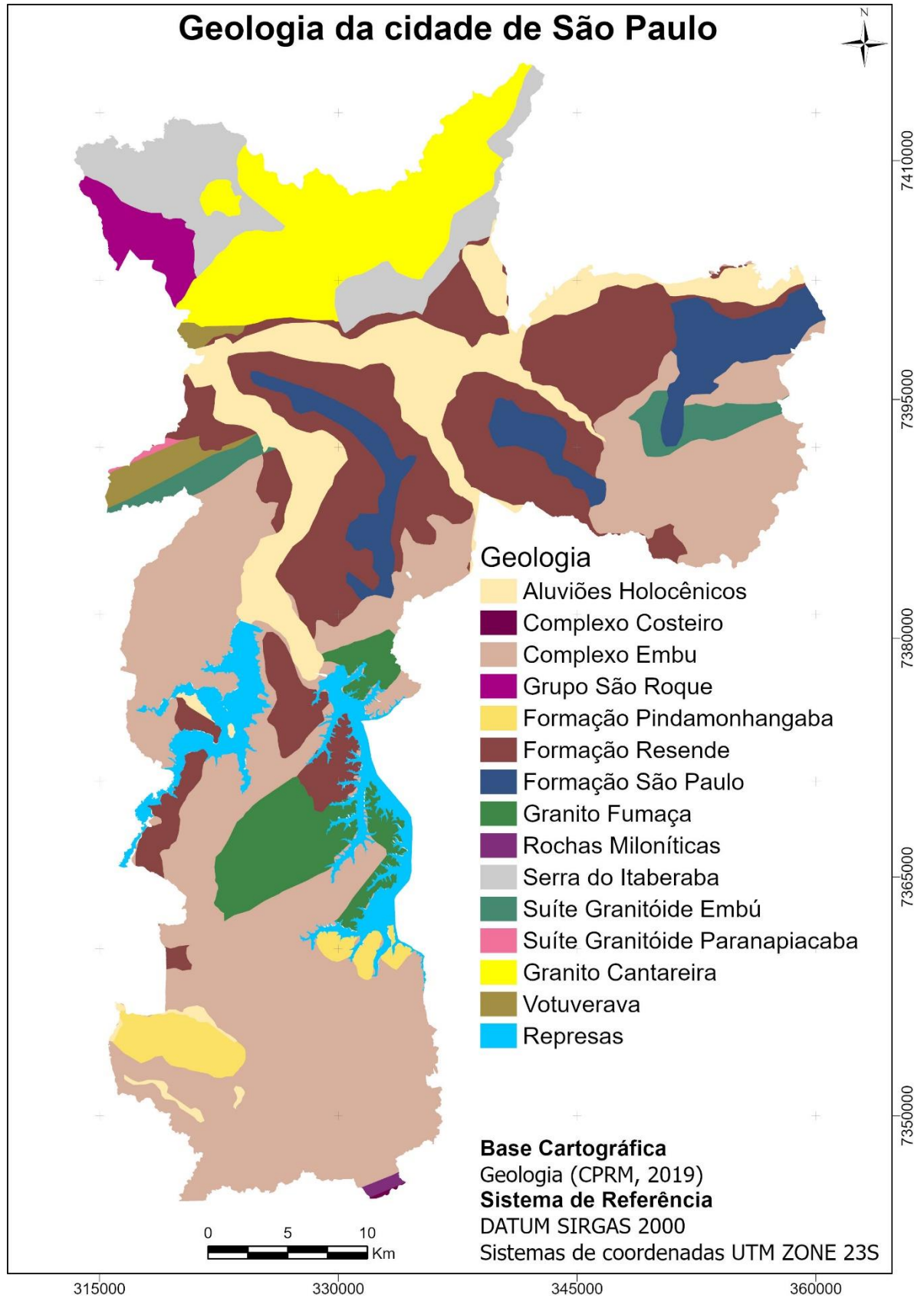
Fonte: O Autor (2021).

3.1 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A cidade de São Paulo desenvolveu-se sob terrenos policíclicos do Cinturão de Dobramentos Ribeira (Hasui *et al.* 1975). É composta por gnaisses, rochas metamórficas de baixo e médio grau, migmatitos e granitoides relativos ao Ciclo Brasileiro e suítes diversas de rochas granitóides intrusivas, do neoproterozóico que, em conjunto, compõem o embasamento cristalino regional (Hasui *et al.* 1975; Riccomini, 1989; Gurgueira, 2013).

Nesse viés, o contexto geológico da cidade de São Paulo (Figura 17) é detalhado a seguir e apresenta a seguinte sequência estratigráfica: embasamento pré-cambriano, rochas sedimentares paleógena e neógenas da Bacia de São Paulo e coberturas quaternárias.

Figura 17 - Estrutura geológica da cidade de São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da CPRM (2019).

O substrato rochoso é composto, majoritariamente, por rochas cristalinas de idade pré-cambriana dispostas em morros, morrotes e serras; por camadas de sedimentos terciários situados em terrenos colinosos, além de sedimentos relativamente mais recentes, correspondentes ao período quaternário e situados em regiões de várzeas ou baixadas aluvionares (Pellogia, 1997).

Melo *et al.* (1987) considera que os sedimentos coluvionares e as associações colúvio-aluvionares ocorrem acima dos sedimentos terciários e do embasamento pré-cambriano, predominando ao longo das várzeas das atuais redes de drenagem. Os processos geológicos ocorridos neste curto período ainda estão em atividade perdurando até os dias atuais (Takiya, 1997, Suguio; Sallun, 2004). Os depósitos quaternários são também importantes pelo fato de que 70% da população humana vive nas planícies costeiras e fluviais (de inundação), originadas por processos marinhos e fluviais, respectivamente (Takiya, 1997, Suguio; Sallun, 2004). O Complexo Costeiro (Hasui *et al.* 1981) tem o seu ponto de afloramento no litoral paulista, possuindo uma pequena porção ao Sul da cidade de São Paulo (SP). Sua mineralogia é compreendida por gnaisses, gnaisses granitóides, gnaisses granatíferos, rochas charnockíticas e lentes embutidas de quartzitos, rochas calciossilicáticas, mármore, anfibolitos e rochas metabásicas, quartzo, microclínio, oligoclásio, hornblenda e biotita (Fernandes, 1991; Tassinari, 1988; Dias Neto, 2001; Riccomini *et al.* 2004). Rodriguez (1998) destaca que, pela presença de gnaisses e migmatitos, a ocorrência de escorregamentos nesta área é relativamente média.

O Complexo Embu (Hasui; Sadowski, 1976), é o domínio de maior expressividade na Bacia de São Paulo, ocorre em quase toda a área inclusive na Bacia de Taubaté. A formação litológica do Complexo Embu constitui-se de gnaisses e migmatitos, anfibolitos, dolomitos, xistos verdes, corpos lenticulares de quartzitos, rochas calciossilicatadas e ectiniticas (Tassinari, 1988; CPRM, 1991; Juliani 1992; Juliani, 1993; Rodriguez 1998; Riccomini *et al.*, 2004). Rodriguez (1998) destaca que, pela presença de xistos existentes na maioria da área onde o Complexo Embu aflora, a ocorrência de escorregamentos é considerada alta.

As rochas da Serrania do Grupo São Roque (Almeida, 1964; Hasui *et al.* 1969, Hasui, Hama, 1972, Hasui, 1973) estão expostas na porção sudeste e norte da cidade de São Paulo com presença de corpos graníticos intrusivos de tipos e tamanhos variados, dentre eles os maciços das serras da Cantareira, Itaberaba, Itaqui e o

Maciço de Mairiporã (Van Schumi, 1986; Juliani 1992; Juliani, 1993; Chieregati *et al.* 1991)

Devido à presença de filitos, xistos e metarritimitos, a ocorrência de escorregamentos na parte norte da Serra da Cantareira é considerada de potencialidade alta, no entanto, na parte oeste da serra a potencialidade de ocorrência se torna baixa por esta ser constituída principalmente de quartzitos e metarenitos (Rodriguez, 1998).

A Formação Resende (Grupo Taubaté) apresenta sedimentos de formação grosseira, dispostos em sistemas de leques depósitos aluviais, com gradiente entre arenosos e siltítico-argiloso predominando conglomerados polimíticos e diamictitos, lamitos e conglomerados de sistema fluvial entrelaçados com matéria orgânica em abundância, formados em clima de semiaridez com períodos de chuvas centralizadas (Melo *et al.* 1986; Riccomini, 1989). Estes sedimentos foram considerados como de baixa potencialidade para a ocorrência de escorregamentos por estarem localizados em vertentes e colinas de relevos suavizados (Rodriguez, 1998).

Os depósitos da Formação São Paulo (Grupo Taubaté) são caracterizados por sedimentos fluviais dispostos em meandros pretéritos compostos de granulação fina onde predominam areias e argilas silticas (Suguio *et al.* 1971; Riccomini, 1989). A Formação São Paulo ocupa a maior parte da Bacia de São Paulo. Os seus depósitos sustentam relevos acidentados e de altas colinas (Takiya, 1991, 1997; Riccomini; Coimbra, 1992).

A Formação Itaquaquecetuba (Grupo Taubaté) (Coimbra *et al.* 1983) é formada por terrenos arenosos, lamitos, argilas e conglomerados, os depósitos sedimentares são associados a sistema fluvial anastomosados, entrelaçados e relacionados a leques aluviais, apresentando troncos fósseis de diferentes metragens e espessuras variadas. Assim como megaclastos de folhelhos e siltitos pertencentes, de acordo com os autores, à Formação São Paulo (Riccomini *et al.* 2004).

Os sedimentos da Formação Tremembé (Grupo Taubaté) foram considerados em sua litologia por Suguio (1969) como sedimentos predominantemente lacustres. Riccomini (1989), Riccomini *et al.* (2004) caracteriza-os como depósitos lacustres oriundos de sistemas playa-lake ocorrendo com mais expressividade na região central da Bacia de Taubaté, correlacionados com os depósitos da Formação Resende. Os seus sedimentos são constituídos de argilitos, folhelhos entremeados e matéria

orgânica, arenitos, dolomitos e argilas siltosas, possuindo coloração preta a cinza-esverdeadas (Takiya, 1991, 1997; Riccomini; Coimbra, 1992; Riccomini *et al.*, 2004).

O Grupo Serra de Itaberaba ocorre na porção norte da cidade de São Paulo e nas regiões dos municípios de Guarulhos e Mairiporã (Gurgueira, 2013). É constituído predominantemente por biotita-muscovita xistos sem estruturas sedimentares preservadas (Juliani 1992; Juliani, 1993). A potencialidade de ocorrência a escorregamentos no Grupo Serra de Itaberaba é considerada alta pela presença de filitos, xistos e metarritimitos existentes na porção norte da Serra da Cantareira (Rodriguez, 1998).

Os corpos graníticos (Granito Fumaça, Granito Cantareira, Suíte Granitoide Embú e Suíte Granitoide Paranapiacaba) que ocorrem no entorno da cidade de São Paulo são batólitos e pequenos stocks de granitóides alguns parcialmente recobertos pelos sedimentos da Bacia de São Paulo (Rodriguez, 1998). Com uma maior resistência relativa ao processo de intemperismo, estas rochas sustentam batólitos como as Serra da Cantareira, Serra do Itapeti, dentre outras. São corpos de elevado perfil topográfico e de diferentes tamanhos e ocorrem predominantemente na região norte do município de São Paulo e ao sul em corpos isolados (Rodriguez, 1998; Hasui *et al.*, 1981).

Os maiores problemas ocorrem quando há ocupação nos maciços de solo oriundos da alteração dos corpos graníticos como a instabilização de blocos e matacões (Rodriguez, 1998). Apresentam potencialidade baixa e média para escorregamentos, agravados em áreas com declividades superiores a 60%, em aterros lançados e pelo fato destes corpos serem resistentes ao intemperismo (Rodriguez, 1998).

A Bacia de São Paulo, situa-se no Planalto Paulistano e seu preenchimento é caracterizado por sedimentos terciários e capeada por depósitos quaternários, pertencentes à unidade morfoestrutural das Bacias Sedimentares Cenozóicas e à Unidade Morfoescultural do Planalto de São Paulo (Ross; Moroz, 1997). O corpo estrutural da cidade de São Paulo constitui-se de uma área de 900km², de forma elíptica, formato este emprestado à bacia homônima, de acordo com Freitas (1951), pela maior expressividade dos depósitos ao longo da calha do rio Tietê.

Os sedimentos terciários ocorrem em toda a área central da cidade de São Paulo, assim como em toda a extensão da margem esquerda do rio Tietê e em alguns

pontos isolados ao sul, ao norte e no Sudoeste (Takiya, 1991; Takiya *et al.* 1992; Rodriguez, 1998).

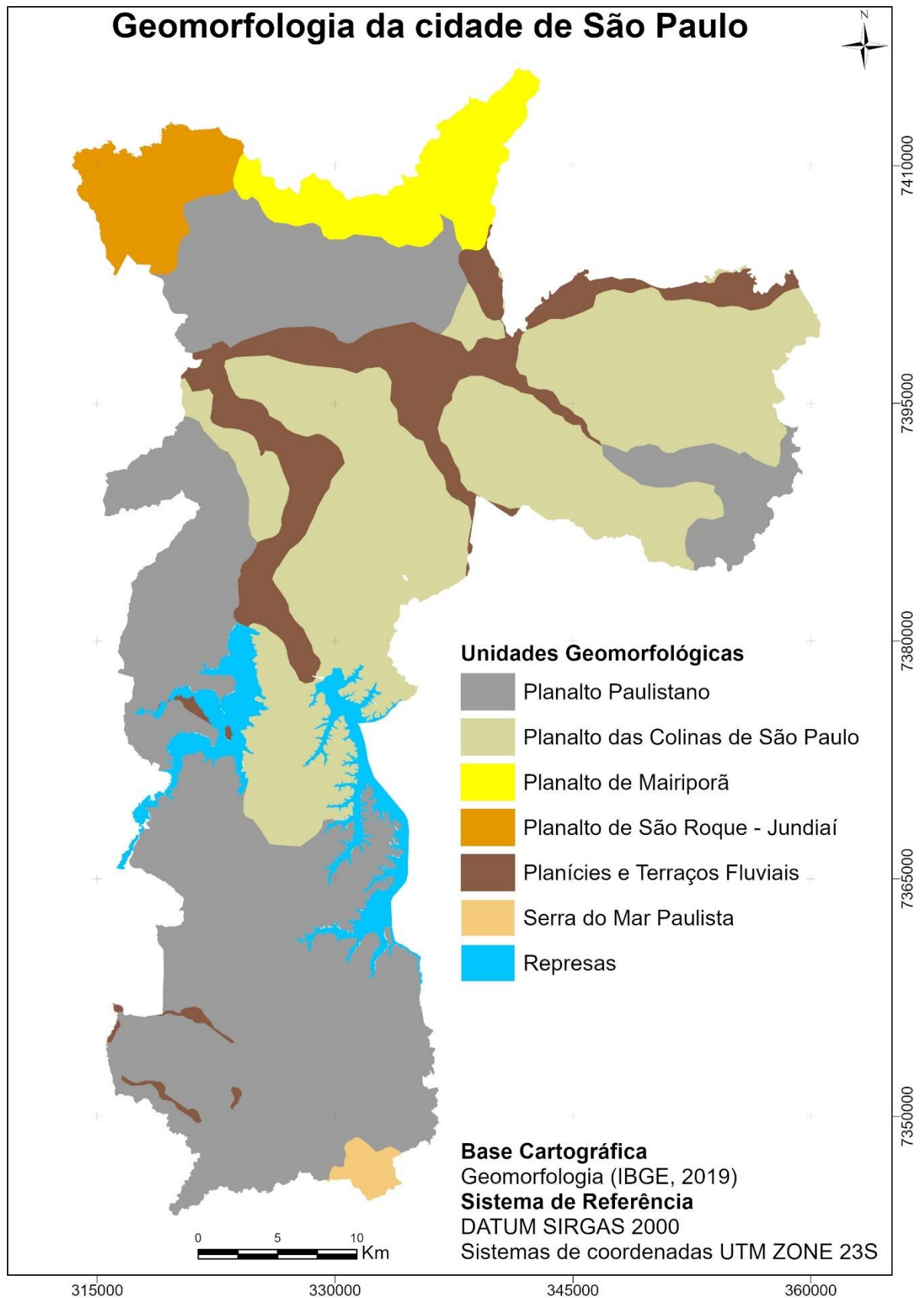
Os sedimentos quaternários que a compõe estão localizados tanto em sua área central como distribuídos ao longo das várzeas dos rios e córregos atuais intensamente remoldados pela ação antrópica (Rodrigues, 2005). Em seu corpo predominam sedimentos arenosos, argilas e conglomerados resultantes de sistemas fluviais e de leques aluviais com presenças de sedimentos pelíticos lacustres. (Takiya, 1991; Takiya *et al.* 1992; Rodriguez, 1998).

No contexto geomorfológico (Figura 18), o município de São Paulo está inserido no compartimento morfoestrutural do Cinturão Orogênico do Atlântico unidade morfoescultural Planalto Atlântico e unidade morfológica Planalto Paulistano/Alto Tietê, subdividindo-se em seis compartimentos (Ross; Moroz, 1997). O Planalto Paulistano, ocupando a maior parte do território, Planalto das Colinas de São Paulo, Planalto de Mairiporã, Planalto de São Roque e Jundiaí, Planícies e Terraços Fluviais e Serra do Mar Paulista (Almeida, 1964; Ross; Moroz, 1997; IBGE, 2019).

O seu relevo é composto por colinas, morros e morrotes (Figura 19) de dissecação média, com topos convexos, com altitudes que variam entre 718 m e 830 m, que correspondem aproximadamente às altitudes dos fundos de vales do Tietê e do Pinheiros ao limite de altitude do Espigão Central (Ab'Sáber, 1957; Ross; Moroz, 1997; CPRM, 2015). As drenagens apresentam um padrão dendrítico, com densidades entre média e alta, com vales entalhados (Ab'Sáber, 1957; Ross; Moroz, 1997; CPRM, 2015).

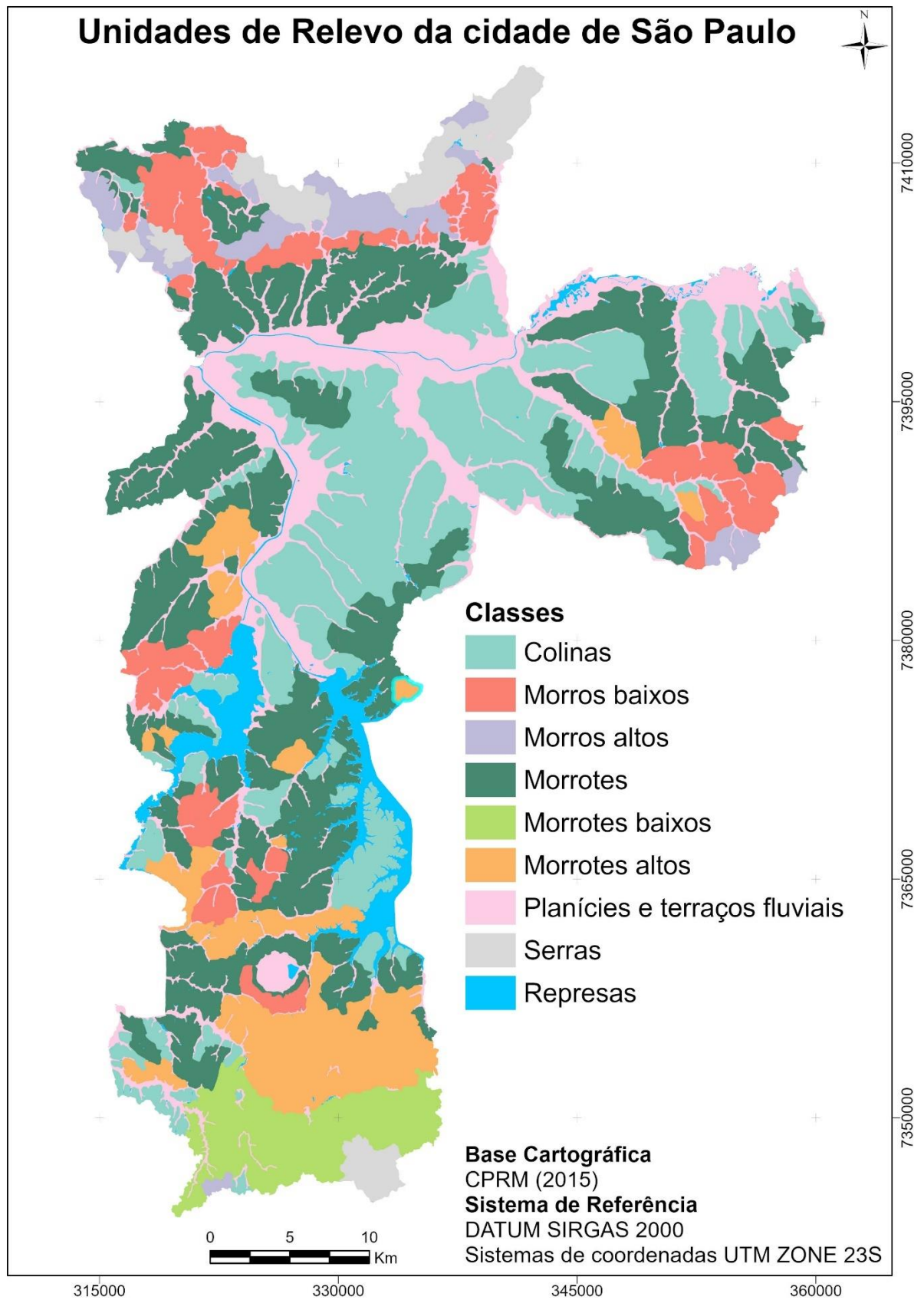
Diante disso, como já ressaltado, as formas de relevo originadas na Bacia de São Paulo têm uma menor sensibilidade à erosão por escoamento em superfície, concentrado ou em lençol, situação contrária aos terrenos pré-cambrianos situados no rebordo da bacia; estes são mais propensos à erosão que por vezes resultam na instabilização das encostas, culminando em escorregamentos, solapamentos de solos e subsidências (Moroz, 2010).

Figura 18 - Mapa Geomorfológico da cidade de São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados do IBGE (2019).

Figura 19 - Unidades de relevo presentes na cidade de São Paulo – RMSP



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da CPRM (2015).

Os dados de geologia foram obtidos a partir do banco de dados da CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, em formato de vetorial (*shapefile*), disponível de forma gratuita. Para Pascale *et al.* (2013), a geologia interfere diretamente na ocorrência de escorregamentos de terra, sendo este o parâmetro que controla a estabilidade do talude e por ser responsável por sua resistência ao cisalhamento (Zêzere *et al.* 2017).

3.2 CLIMA, HIDROGRAFIA, SOLOS E VEGETAÇÃO

O Município de São Paulo localiza-se a uma latitude relativa a 23°21' e longitude de 46° 44', junto ao trópico de Capricórnio e seu clima caracteriza-se como clima de transição entre os **Climas Tropicais Úmidos de Altitude**, com intervalos secos definidos, e os denominados subtropicais, continuamente úmidos do Brasil meridional (Tarifa; Armani, 2000; Takiya, 2002). Os principais agentes controladores climáticos naturais que definem os climas locais e mesoclimas (unidades climáticas naturais), são o Oceano Atlântico, a altitude, o relevo e suas variadas formas e orientações (Tarifa; Armani, 2000; Takiya, 2002).

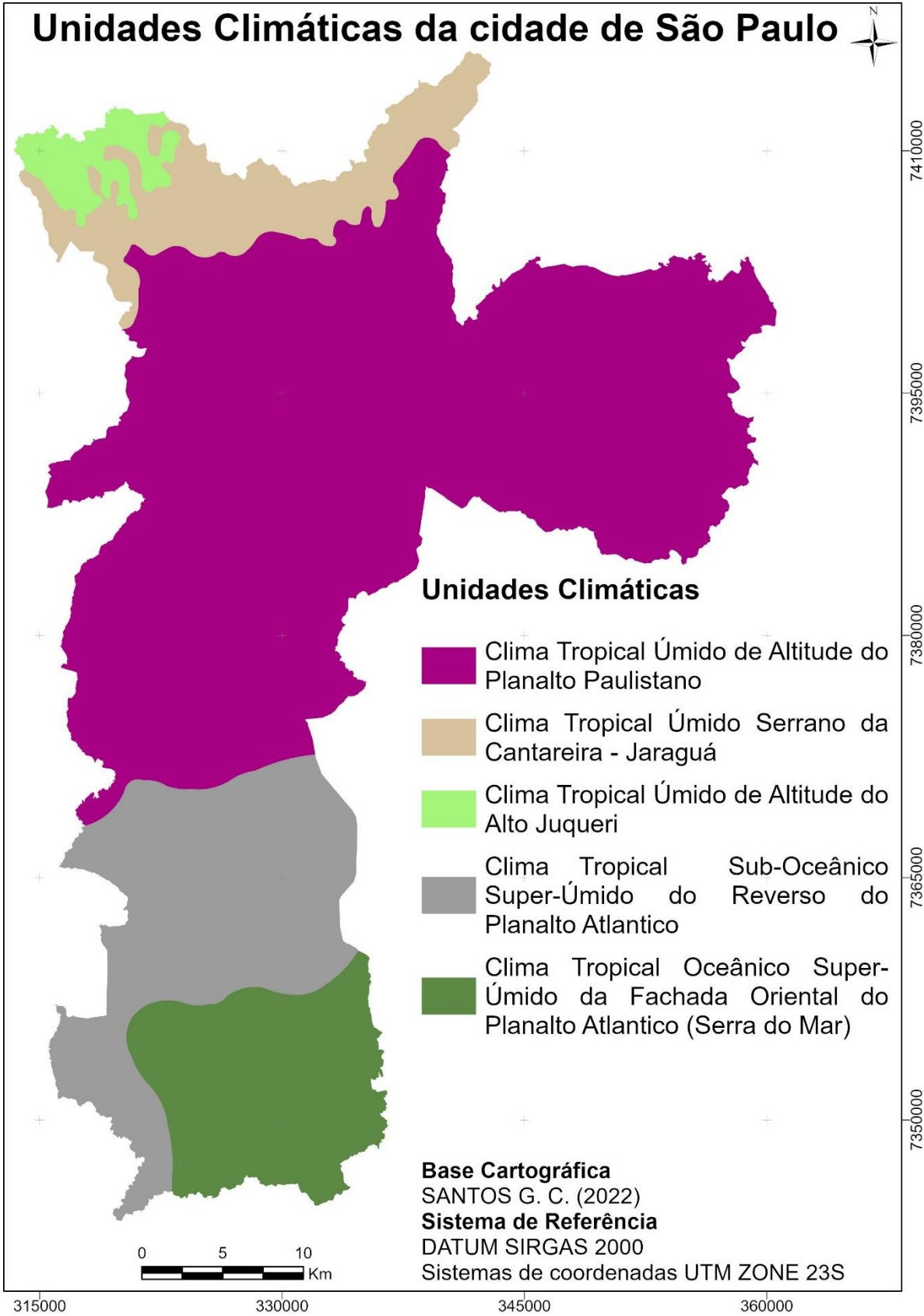
Conforme as ações dos controladores climáticos e das condições topográficas de cada clima, Tarifa e Armani (2000) subdividiram-nos em cinco unidades climáticas locais (Figura 20). O Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Atlântico ocupa, no geral, quase toda a área da cidade de São Paulo. Os diferentes mesoclimas existentes são os maciços de topografias mais elevadas, as serras e altas colinas, as colinas de médias altitudes, os morros baixos, os terraços e patamares e as várzeas e baixos terraços (Tarifa; Armani, 2000; Takiya, 2002).

O segundo foi definido como Clima Tropical Úmido Serrano da Cantareira – Jaraguá, subdividindo-se nos mesoclimas dos maciços e serras da face sul da Cantareira e Jaraguá, onde se encontra o Parque da Cantareira, e os maciços e serras da face norte da Cantareira e Jaraguá, abrangendo os topos orientados para a Bacia do Rio Juquerí (Tarifa; Armani, 2000; Takiya, 2002). Ainda na face norte, nas altitudes entre 720 e 800 metros foi definido um outro clima local, denominado Clima Tropical Úmido de Altitude do Alto Juquerí (Tarifa; Armani, 2000; Takiya, 2002).

Na parte Sul do Município de São Paulo, ao Sul da represa de Guarapiranga, considerando a sua maior aproximação com o Oceano Atlântico, foi definido o Clima

Tropical Suboceânico Superúmido do Reverso do Planalto Atlântico e por último o Clima Tropical Oceânico Super-úmido da Fachada Oriental do Planalto Atlântico (Serra do Mar) (Tarifa; Armani, 2000; Takiya, 2002).

Figura 20 - Mapa da subdivisão das unidades climáticas locais de São Paulo – SP



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do georreferenciamento da imagem de Tarifa e Armani (2001).

Segundo a classificação de Köppen o município de São Paulo pertence ao tipo climático Cwa que o apresenta como clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Atlântico, com chuvas no verão e seca no inverno, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, clima que predomina na maior parte do Estado de São Paulo (EMURB, 2013; NOVAIS, 2023).

A temperatura média anual situa-se entre 20°C e 25°C chegando a temperaturas inferiores a 18°C em áreas mais elevadas (SEMPA, 2002; EMURB, 2013). No verão são comuns médias das máximas de 30°C a 32°C, principalmente no mês de janeiro (SEMPA, 2002; EMURB, 2013). A temperaturas mínimas varia de 6°C a 20°C no inverno, com mínimas absolutas variando de 4°C a 8°C, sendo que as temperaturas mais baixas são registradas em áreas mais elevadas (SEMPA, 2002; EMURB, 2013).

Os regimes pluviométricos da cidade de São Paulo apresentam boa definição onde a pluviosidade média total de chuva anual é de 1441 mm, onde janeiro constitui-se como o mês de maior ocorrência média de chuva é (237,4 mm) e agosto (39,6 mm) como o mês com menor índice de precipitação (Alves; Galvani, 2012). A estação chuvosa (de outubro a março) tem um índice médio em torno de 1.000 mm e a estação seca (de abril a setembro), um índice de cerca de 300 mm (PMSP, 1999).

A intensidade das chuvas que ocorrem na cidade de São Paulo está relacionada às linhas de instabilidade, por vezes relacionadas ao espalhamento das frentes frias (Bender, 2012), e ao sistema de convecção local (Lima *et al.* 2010). Outros eventos que contribuem com a precipitação intensa são as médias sazonais e anuais, às variações interanuais e os sistemas sinóticos como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que tem a sua ocorrência principalmente no verão (Liebmann *et al.* 2001; Carvalho *et al.* 2002; Lima *et al.* 2010; Bender, 2012), ao *El Niño* (Carvalho *et al.* 2002), aos Jatos de Baixo Nível (Carvalho *et al.* 2002; Carvalho *et al.* 2004; Marengo *et al.* 2004; Gan *et al.* 2009; Silva Dias, 2012), oriundos da umidade do Atlântico Equatorial e da bacia Amazônica que escoam em direção ao centro e sudeste da América do Sul (Kodama, 1992,1993; Gan *et al.* 2009) e as brisas que vêm do Atlântico Sul (Nobre *et al.* 2011).

As chuvas relacionadas às frentes frias com frequência são de longa duração abrangendo vastas áreas, no entanto as chuvas relacionadas às linhas de instabilidades comumente têm curta duração, porém são aquelas que ocasionam

alagamentos em vias públicas e transbordamentos de córregos e rios (Nobre *et al.* 2011) e, associados ao crescimento espontâneo da cidade e às ocupações em áreas de risco como encostas e margens de cursos d'água, leva ao perigo de inundações e escorregamentos (Marengo *et al.* 2020).

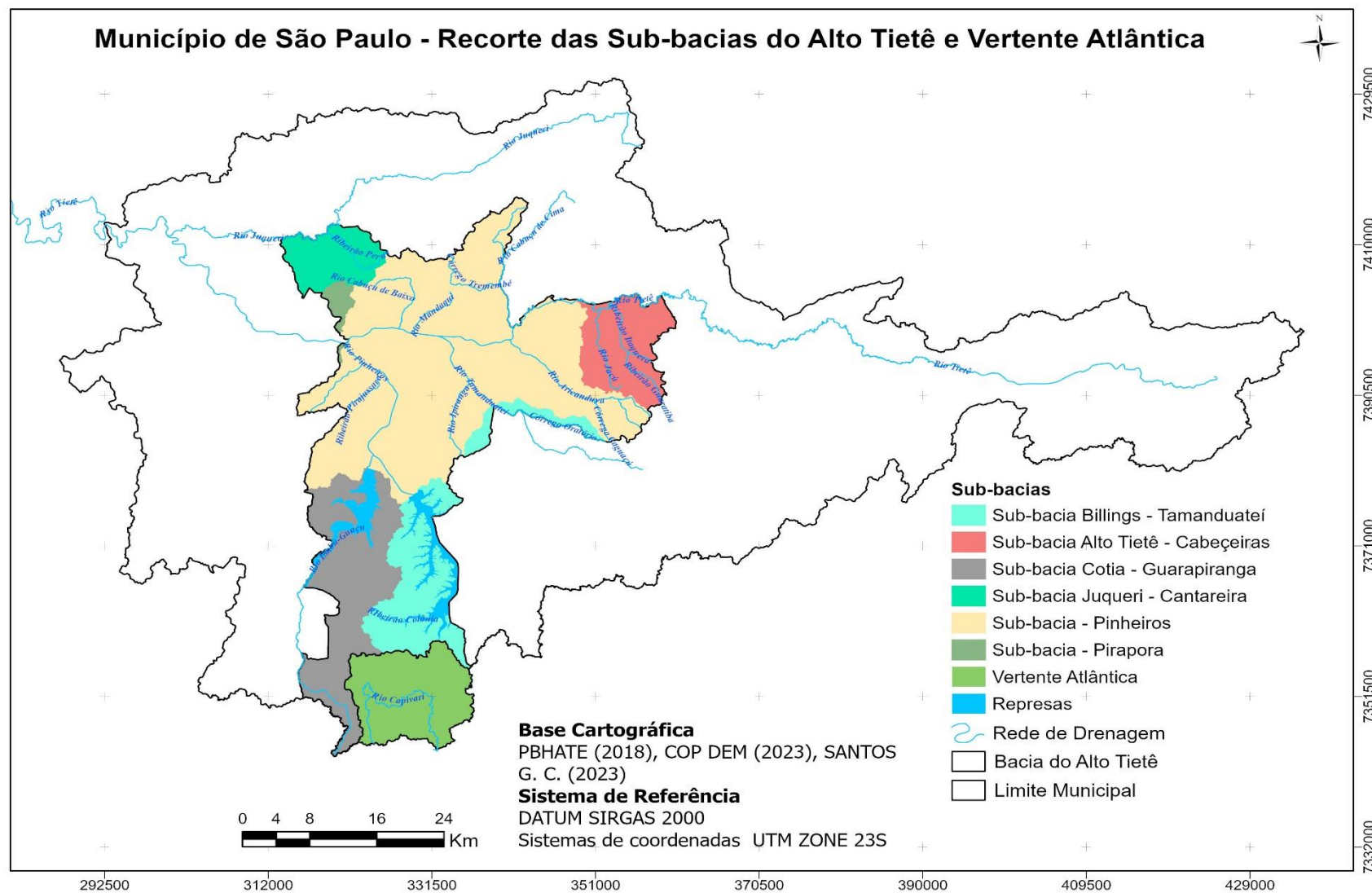
A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) caracteriza-se como um evento meteorológico de suma relevância que estabelece a estação de chuva (Kodama, 1992; Carvalho *et al.* 2004; Rosa *et al.* 2020). Caracteriza-se por uma banda de nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste com duração mínima de quatro dias (Kodama, 1992; Carvalho *et al.* 2004; Rosa *et al.* 2020), raramente persistindo por mais de 10 dias (Liebmann *et al.* 2001).

Um dos principais eventos correlacionados à ZCAS é a alta pluviosidade, principalmente no final da primavera austral e nos meses de verão (Carvalho *et al.* 2002; Carvalho *et al.* 2004). O período de chuva na cidade de São Paulo tem o seu auge nos meses de dezembro a fevereiro com enfraquecimento no início de março (Carvalho *et al.* 2002). Na cidade de São Paulo no período de 1933 - 2010, ocorreu um evento de precipitação diária extrema e intensa (Silva Dias *et al.* 2013), bem como volume total da estação chuvosa e frequência de dias secos consecutivos (Marengo *et al.* 2020).

Carvalho *et al.* (2002), argumentam que em torno de 65% de todos os episódios extremos de chuva sucedem quando o movimento convectivo na ZCAS sucedeu de maneira extensa e intensa e que 30% dos casos em que precipitações intensas sucederam ao norte do Estado de São Paulo. Os eventos de precipitação extrema estão associados ao fortalecimento das zonas convectivas sobre o Oceano Atlântico Sudoeste e os episódios de *El Niño* quando a ZCAS está associada a uma atividade convectiva aumentada sobre o Atlântico subtropical ocidental (Carvalho *et al.* 2002).

A rede hidrográfica da cidade de São Paulo (Figura 21) é constituída pela Bacia e Sub-bacias do Alto Tietê (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 6 do Alto Tietê) e uma pequena parte situada na Vertente Atlântica, pertencente à UGRHI 7 da Baixada Santista, cuja rede de drenagem vertem para o litoral (Rodriguez, 1998; SVMA; IPT, 2004).

Figura 21 - Localização do município de São Paulo no contexto da Bacia Alto Tietê e Vertente Atlântica



Fonte: SANTOS G. C. (2022), PBHATE (Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê) (2018).

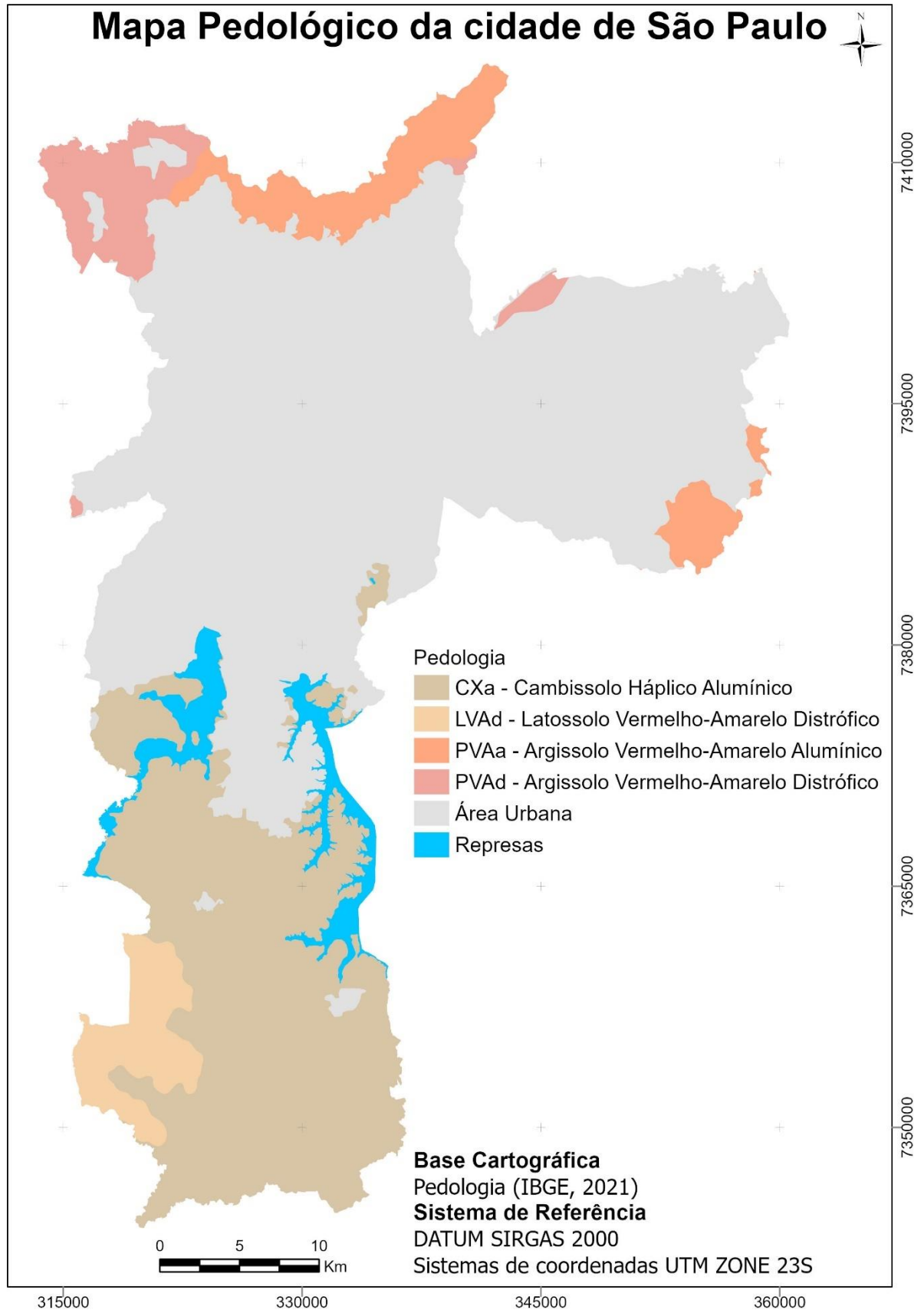
Os principais cursos d'água que percorrem o município de São Paulo são os rios Tietê, Pinheiros, Tamanduateí e Aricanduva, que drenam suas águas para o primeiro, o rio Embu-Guaçu no extremo sul da cidade, além dos córregos Pirajussara, Ipiranga, Cabuçu de Cima e Cabuçu de Baixo, entre outros (SVMA; IPT, 2004; Silva, 2005; Fonseca, 2008). A cidade ainda comporta a Represa do Guarapiranga e parte do reservatório da Represa Billings, ambas situadas na Zona Sul e em situação de degradação ambiental devido às intervenções antrópicas (Rodrigues, 1998; SVMA; IPT, 2004; Rodrigues, 2005).

A cidade de São Paulo está inserida nos domínios de Mata Atlântica (Ab'Sáber, 2012) e sua cobertura vegetal é composta por fragmentos de vegetações nativas secundárias sendo estas a floresta ombrófila densa, situada nas escarpas e no reverso da Serra do Mar, a floresta ombrófila densa alto montana, situada na região da Serra da Cantareira e do Pico do Jaraguá, caracterizada como vegetação de transição entre a Mata Atlântica e a Mata de Planalto, formações de várzea e campos naturais (SVMA; IPT, 2004; Silva, 2005).

Contrastando com a mancha urbana, a cidade ainda possui importantes áreas verdes como a Área de Proteção Ambiental Capivari-Monos localizada no extremo sul, o Parque Estadual da Serra da Cantareira localizado na região norte, o Parque do Estado, na região sul, o Parque Estadual do Jaraguá na região oeste dentre outros (SVMA/SEMPLA, 2002; SVMA; IPT, 2004).

Segundo o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (Oliveira *et al.* 1999; ROSSI, 2017), Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007, 2021) e Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos *et al.* 2006; Santos 2018), o perfil pedológico (Figura 22) da cidade de São Paulo apresentam solos do tipo Argissolo Vermelho – Amarelo Alumínico (PVAa) e Argissolo Vermelho – Amarelo Distrófico (PVAd), com ocorrência nas zonas Leste, Oeste e Norte em zonas serranas de relevo forte e ondulado, apresentando texturas muito arenosa, argilosa e muito argilosa. Os Cambissolos Háplico Alumínico (CXa) e o Latossolo Vermelho – Amarelo Distrófico (LVAd) são predominantes na Zona Sul e extremo sul da cidade de São Paulo, ocupando áreas de relevo forte, montanhoso e escarpado, possuindo texturas argilosa, média e muito argilosa (Oliveira *et al.* 1999; IBGE, 2007, 2021; Rossi, 2017; Santos *et al.* 2006; Santos, 2018).

Figura 22 - Mapa Pedológico da cidade de São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados do IBGE (2021).

3.3 USO DA TERRA, ÁREAS DE RISCO E ESCORREGAMENTOS NA CIDADE DE SÃO PAULO

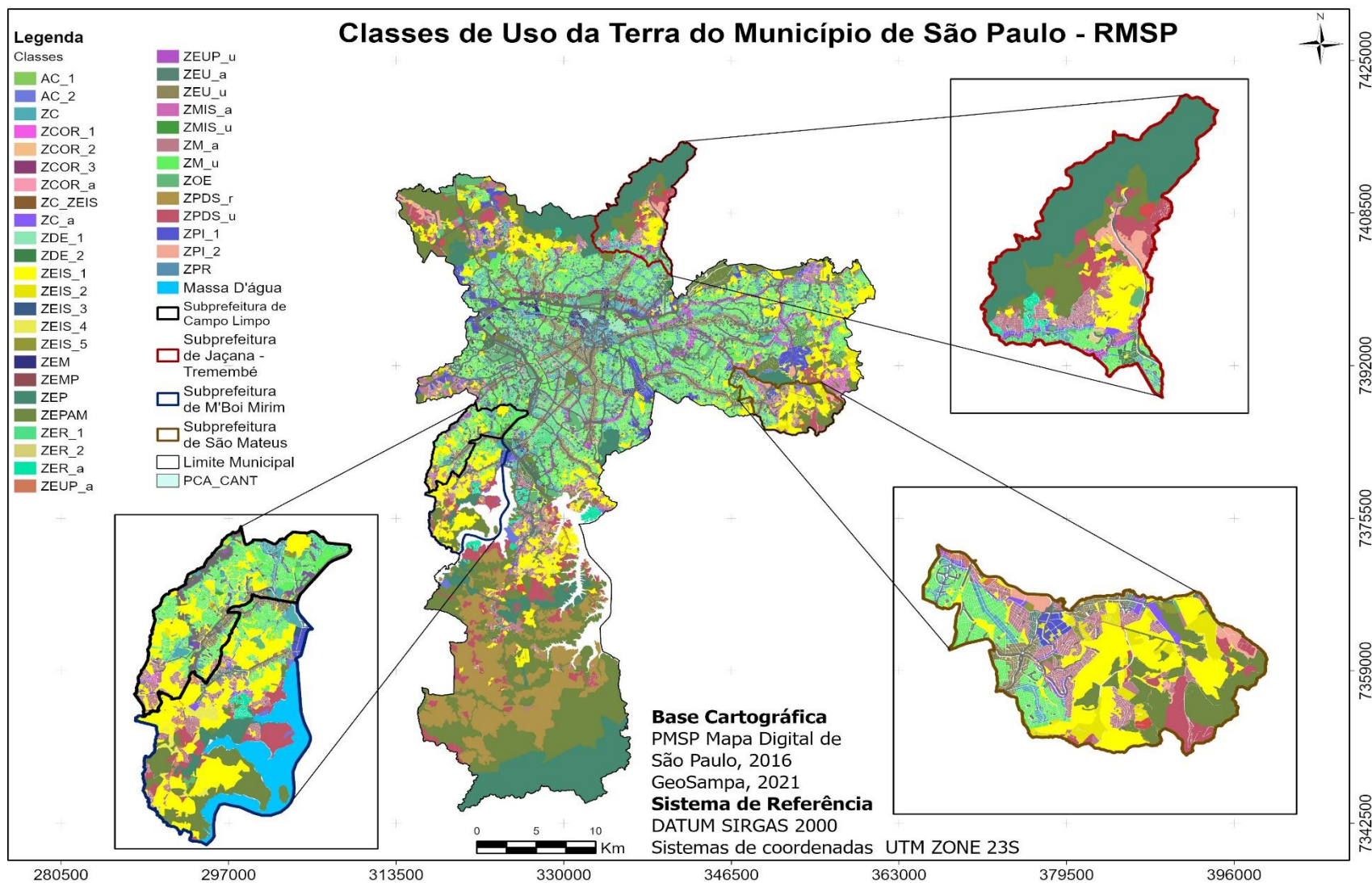
Sancionada no dia 23 de março de 2016, a Lei 16.050/2014 ou Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (LPUOS) normatiza a ação pública e privada sobre as formas de uso e ocupação da terra (Figura 23) da cidade de São Paulo. A Lei de Zoneamento define os instrumentos de parcelamento (Quadro 03), uso e ocupação da terra e a aplicação desses instrumentos no território.

Dentre os principais instrumentos definidos no Plano Diretor Estratégico (PDE) de São Paulo, estabelecido em 2014, estão as Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), que são áreas prioritárias para a produção de Habitações de Interesse Social, a Zona Especial de Proteção Ambiental (ZEPAM) e a Zona Especial de Preservação (ZEP) (PMSP, 2015). Por exemplo, na região da subprefeitura de Jaçanã - Tremembé, marcada por favelas e loteamentos irregulares, regularizados ou em processo de regularização, grande parte de seu território foi incluído na ZEIS 1.

A mudança de uso e ocupação da terra é significativa para uma série de temas e questões centrais para o estudo da mudança territorial. A consolidação do espaço urbano na cidade de São Paulo e a expansão das áreas em seu entorno são dois quadros importantes relacionados ao movimento de expansão urbana, fator que exerce forte pressão sobre os recursos naturais existentes (Nobre; Young, 2013).

A forma de uso e ocupação da terra na cidade de São Paulo é diversa, principalmente nas áreas centrais (por exemplo, comércio, serviços, indústria, loteamentos de alto padrão). A concentração de populações de baixa renda ocorrem geralmente em regiões mais carentes em termos de infraestrutura urbana e equipamentos (Souza, 2003), o que causa inquietação diante das precárias condições de habitação, normalmente em áreas de encostas de alta declividade, como nas áreas delimitadas em destaque na Figura 23.

Figura 23 - Classes de uso e ocupação da terra



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da PMSP (2016) e GeoSampa (2021).

Quadro 3 - Definição simplificada dos instrumentos de parcelamento de Uso Ocupação da Terra na cidade de São Paulo, em referência à Figura 23

Legenda	Significado
AC_1	Área de Comércio 1.
AC_2	Área de Comércio 2.
ZC	Zona Centralidade.
ZCOR_1	Zona Corredor 1.
ZCOR_2	Zona Corredor 2.
ZCOR_3	Zona Corredor 3.
ZCOR_a	Zona Corredor Ambiental.
ZC_ZEIS	Zona Centralidade lindeira à ZEIS.
ZC_a	Zona Centralidade Ambiental.
ZDE_1	Zona de Desenvolvimento Econômico 1.
ZDE_2	Zona de Desenvolvimento Econômico 2.
ZEIS_1	Zona Especial de Interesse Social 1.
ZEIS_2	Zona Especial de Interesse Social 2.
ZEIS_3	Zona Especial de Interesse Social 3.
ZEIS_4	Zona Especial de Interesse Social 4.
ZEIS_5	Zona Especial de Interesse Social 5.
ZEM	Zona Eixo de Estruturação da Transformação Metropolitana.
ZEMP	Zona Eixo de Estruturação da Transformação Metropolitana Previsto.
ZEP	As Zonas Especiais de Preservação.
ZEPAM	As Zonas Especiais de Proteção Ambiental.
ZER_1	Zona Exclusivamente Residencial 1.
ZER_2	Zona Exclusivamente Residencial 2.
ZER_a	Zona Exclusivamente Residencial Ambiental.
ZEUP_a	Zonas inseridas na Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental definida do PDE cujo decreto ativador do eixo ainda não foi publicado.
ZEUP_u	Zonas inseridas na Macrozona de Estruturação e Qualificação Urbana definida do PDE cujo decreto ativador do eixo ainda não foi publicado.
ZEU_a	Zonas inseridas na Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental definida do PDE.
ZEU_u	Zona Eixo de Estruturação da Transformação Urbana.
ZMIS_a	Zona Mista de Interesse Social Ambiental.

ZMIS_u	Zona Mista de Interesse Social.
ZM_a	Zona Mista Ambiental.
ZM_u	Zona Mista.
ZOE	Zona de Ocupação Especial.
ZPDS_r	Zona de Preservação e Desenvolvimento Sustentável da Zona Rural.
ZPDS_u	Zona de Preservação e Desenvolvimento Sustentável.
ZPI_1	Zona Predominantemente Industrial 1.
ZPI_2	Zona Predominantemente Industrial 2.
ZPR	Zona Predominantemente Residencial.

Fonte: Modificado pelo autor a partir dos dados da PMSP (2021).

O mapa de uso da terra foi elaborado a partir do banco de dados da Prefeitura do Município de São Paulo – Mapa Digital de São Paulo (2004).

De acordo com os dados contidos no mapa, os assentamentos precários estão concentrados, em grande parte, nas áreas periféricas da cidade de São Paulo, e, principalmente, em setores urbanos inadequados ocupados principalmente por moradores de baixa renda (Ministério das Cidades, 2010). O rápido crescimento da cidade de São Paulo resultou no aumento da incidência e gravidade de riscos ambientais urbanos, como escorregamentos e inundações.

Em sua maioria, os eventos de chuvas fortes ou alterações nas características ambientais naturais, ampliam a incidência de desastres. Em algumas subprefeituras, como as de Campo Limpo e M'Boi Mirim, Jaçanã - Tremembé e São Mateus, a vulnerabilidade ao perigo a escorregamentos é muitas vezes exacerbada pelas condições topográficas locais e pela alta concentração de áreas de risco.

No tocante aos escorregamentos na cidade de São Paulo, Ross (2001) acrescenta que há dois fatores relacionados: o natural e o antrópico, onde o natural relaciona-se às precipitações intensas e à sua potencialidade na deflagração dos processos em áreas declivosas e o antrópico, correlacionado à ocupação inadequada, imposta pelo crescimento espontâneo da cidade.

A impermeabilização das várzeas dos principais rios que cortam a cidade, acarreta problemas dos mais diversos em períodos chuvosos, como alagamentos, enchentes e inundações e nas áreas de relevo mais acentuado, o perigo de escorregamentos de terra, situações que afetam em um contexto geral, toda a

população, acarretando risco de morte e prejuízos econômicos aos moradores, que são os mais afetados, e ao poder público.

As ocupações existentes em toda área da Bacia de São Paulo e principalmente no seu rebordo, onde predomina o relevo cristalino de Aziz Ab'Sáber (1957) e suas encostas de elevada inclinação, favorecem a deflagração de escorregamentos, seja pelo fato da redução da cobertura vegetal (Silva, 2005) seja pela incidência de cortes para construções de moradias, muitas vezes com alto grau de fragilidade, resultando na inconsistência da qualidade de vida da população (Silva, 2005).

Em 2003, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, realizou um mapeamento de risco na cidade de São Paulo em favelas situadas em diversas subprefeituras da cidade de São Paulo, possibilitando a identificação de moradias em locais de risco alto e muito alto, auxiliando o poder local na execução e implementação de um plano de ação destas áreas, objetivando a mitigação de riscos de acidentes geológicos (Nobre *et al.* 2011).

Em 1998, depois de fortes chuvas, vários escorregamentos de terra foram deflagrados na região do bairro Jardim Felicidade, no Jaçanã (zona norte da cidade) vitimando 16 pessoas sendo duas fatais e cerca de 400 pessoas desabrigadas (Jornal Folha de São Paulo, 1998).

No mês de janeiro de 2003 um escorregamento de terra ocorreu no bairro do Jaguaré, zona oeste da cidade e, em junho do mesmo ano, um outro escorregamento ocorreu na zona sul de São Paulo, ambos sem vítimas fatais (Jornal Folha de São Paulo, 2003).

No mês de março de 2008, uma forte precipitação que ocorreu na capital paulista provocou um escorregamento de terra na Vila Brasilândia, zona norte atingindo dois barracos (G1, 2008). No final do ano de 2009, ocorreu um escorregamento de terra na região do Parque São Rafael, na zona leste de São Paulo deixando pelo menos seis vítimas fatais (UOL, 2009).

Em março de 2019, dois eventos de escorregamentos ocorreram na rua Miguel Fernandes no bairro Jardim Iguatemi – Zona Leste de São Paulo em um intervalo de 15 dias, atingindo alguns imóveis e causando muitos danos sociais e econômicos (G1, 2019). Esta região está localizada em área de manancial pertencente à Bacia do Córrego Limoeiro (Listo, 2011).

Em fevereiro de 2020, mais duas ocorrências foram registradas na Zona Norte da cidade em áreas de alta declividade, expondo os moradores ao perigo e ao risco (G1, 2020).

Entre os meses de dezembro de 2019 a janeiro de 2020, a Defesa Civil de São Paulo registrou 41 eventos de escorregamentos de terra na cidade de São Paulo, o que equivale a quase um escorregamento por dia (G1, 2020).

Na cidade de São Paulo, entre os anos de 2012 e 2020, foram registradas 1691 ocorrências de escorregamentos. Somente entre 2019 e o primeiro semestre de 2020, 1002 casos foram registrados na cidade, cujas zonas Leste e Norte foram as mais afetadas.

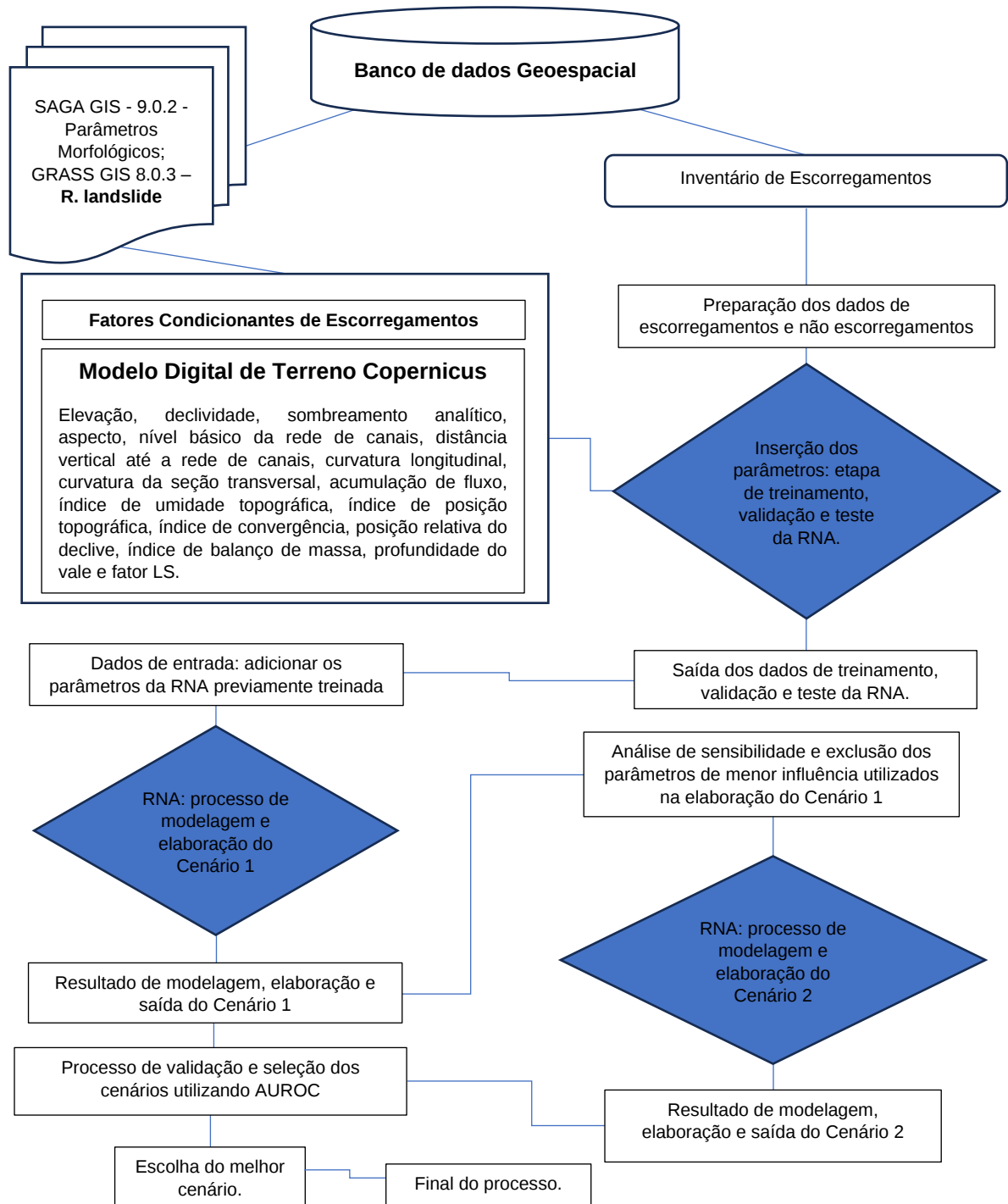
Diante disso, percebe-se que o uso e ocupação da terra é um reflexo das ações antrópicas que age como fator predisponente e o tipo de uso do solo elevam a instabilidade do terreno, podendo aumentar a atividade de escorregamentos (van Westen *et al.*, 1999). Por outro lado, a cobertura do solo exerce influência na ocorrência de escorregamentos ao longo de encostas com vegetação densa e profundamente enraizada (Guillard; Zêzere, 2012).

Neste cenário, os morros, altos espigões e cristas localizados nos bairros pobres das periferias são assustadores em seu belo cenário em relação ao entardecer de luzes e vida agitada, porém devem ser muito piores durante as fortes chuvas de verão, quando os morros e as casas quase despencam; ou nos tempos frios de chuva fina e gelada de outono-inverno (Tarifa; Armani, 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada nesta pesquisa foi dividida em quatro etapas (Figura 24): (4.1) Parâmetros utilizados na RNA; (4.2) Elaboração dos cenários de perigo; (4.3) Elaboração do mapa de inventário (escorregamentos); (4.4) Validação.

Figura 24 - Fluxograma dos processos de modelagem e validação dos Cenários 1 e 2



Fonte: O autor (2024).

4.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA RNA

A escolha dos parâmetros utilizados é de suma relevância para a configuração e execução da RNA. Assim, nesta pesquisa, os parâmetros temáticos utilizados pela RNA foram definidos com base nos estudos realizados por Oliveira *et al.* (2019a), Quevedo *et al.* (2019), Lucchese *et al.* (2020) e Gameiro *et al.* (2022). Tal escolha se deu pela caracterização do relevo e da rede hidrográfica da cidade de São Paulo assim como pela região geográfica da área de estudo escolhida pelos autores, localizada na Serra Geral, região Sul do Brasil, pertencente à mesma morfoestrutura (ROSS, 1992) Bacia do Paraná. Outro fato que corroborou na escolha é a existência de poucas pesquisas na literatura nacional relacionadas a escorregamentos utilizando Redes Neurais Artificiais.

Neste sentido, este trabalho selecionou os principais condicionantes morfológicos que podem atuar na deflagração de escorregamentos. Para a extração destes condicionantes, foi utilizado o software livre SAGA GIS 9.0.2, sendo estes posteriormente trabalhados nos softwares ArcGis Pro 3.0.2 (licença de 21 dias/versão estudante) gentilmente cedida pela ESRI; ArcGis Desktop 10.5 (licença acadêmica), e os softwares livres QGis Desktop versão 3.22.8 – *Białowieża* e GRASS 8.3, este último para a aplicação das Redes Neurais Artificiais a partir do **módulo r. landslide** (Bragagnolo, *et al.* 2019).

Foram elaborados 16 parâmetros morfológicos (Figura 25) a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT) *Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM)* com resolução espacial de 30 metros. Os parâmetros supracitados foram: elevação, declividade, sombreamento analítico, aspecto, nível básico da rede de canais, distância vertical até a rede de canais, curvatura longitudinal, curvatura da seção transversal, acumulação de fluxo, índice topográfico de umidade, índice de posição topográfica, índice de convergência, posição relativa do declive, índice de balanço de massa, profundidade do vale e fator LS, cujos significados e formas de obtenção estão detalhados no Quadro 04.

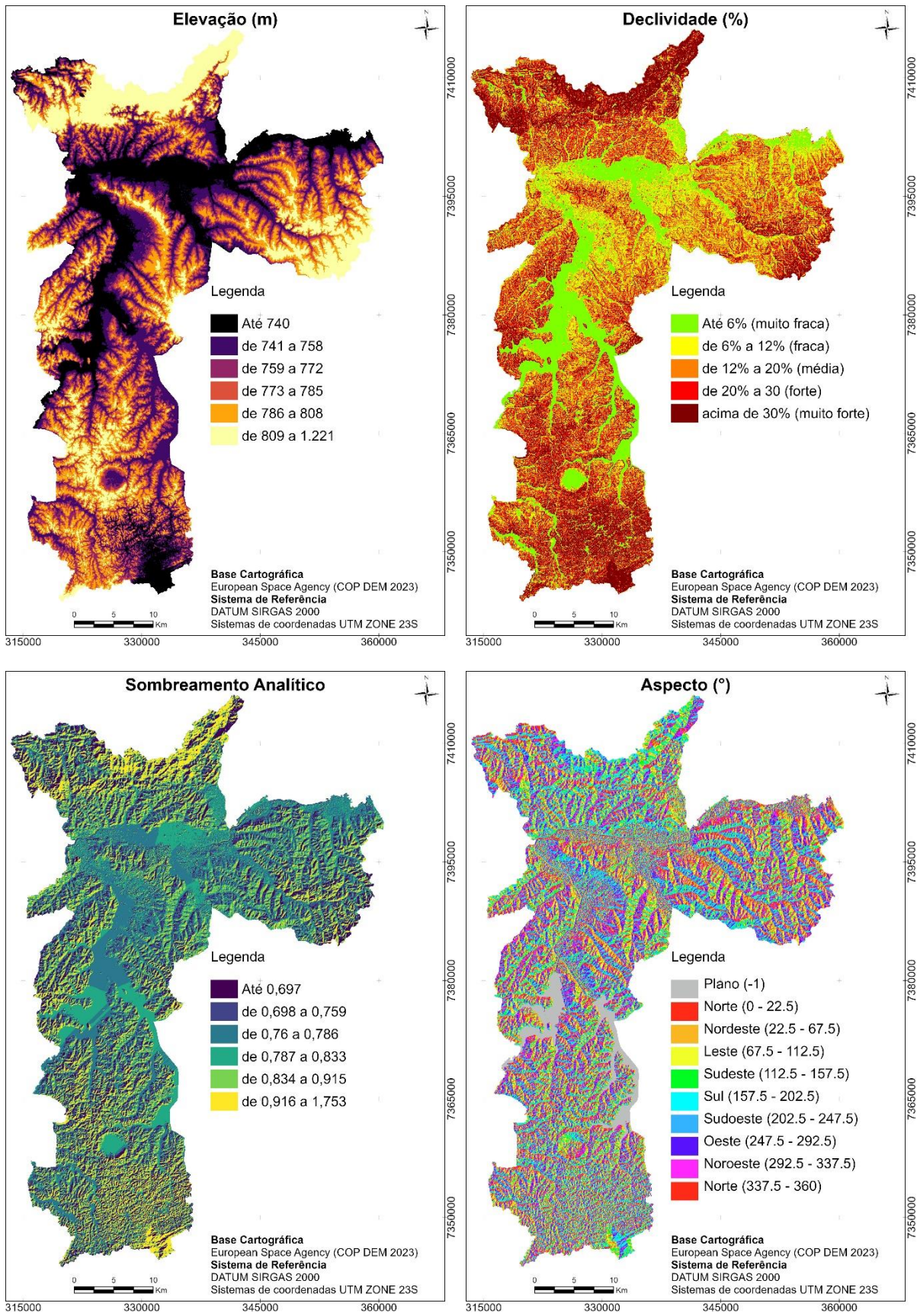
Estes parâmetros foram selecionados devido à sua utilização em diversas pesquisas, como em Oliveira *et al.* (2019), Quevedo *et al.* (2019), Lucchese *et al.* (2020) e Gameiro *et al.* (2022), pela caracterização do relevo da cidade de São Paulo e ao seu papel na deflagração de escorregamentos. Assim, o perigo de ocorrência de

um escorregamento pode ser avaliado graças aos efeitos da topografia e da hidrologia de uma determinada área, cuja umidade do solo exerce função importante na instabilidade da encosta (Gomez; Kavzoglu, 2005).

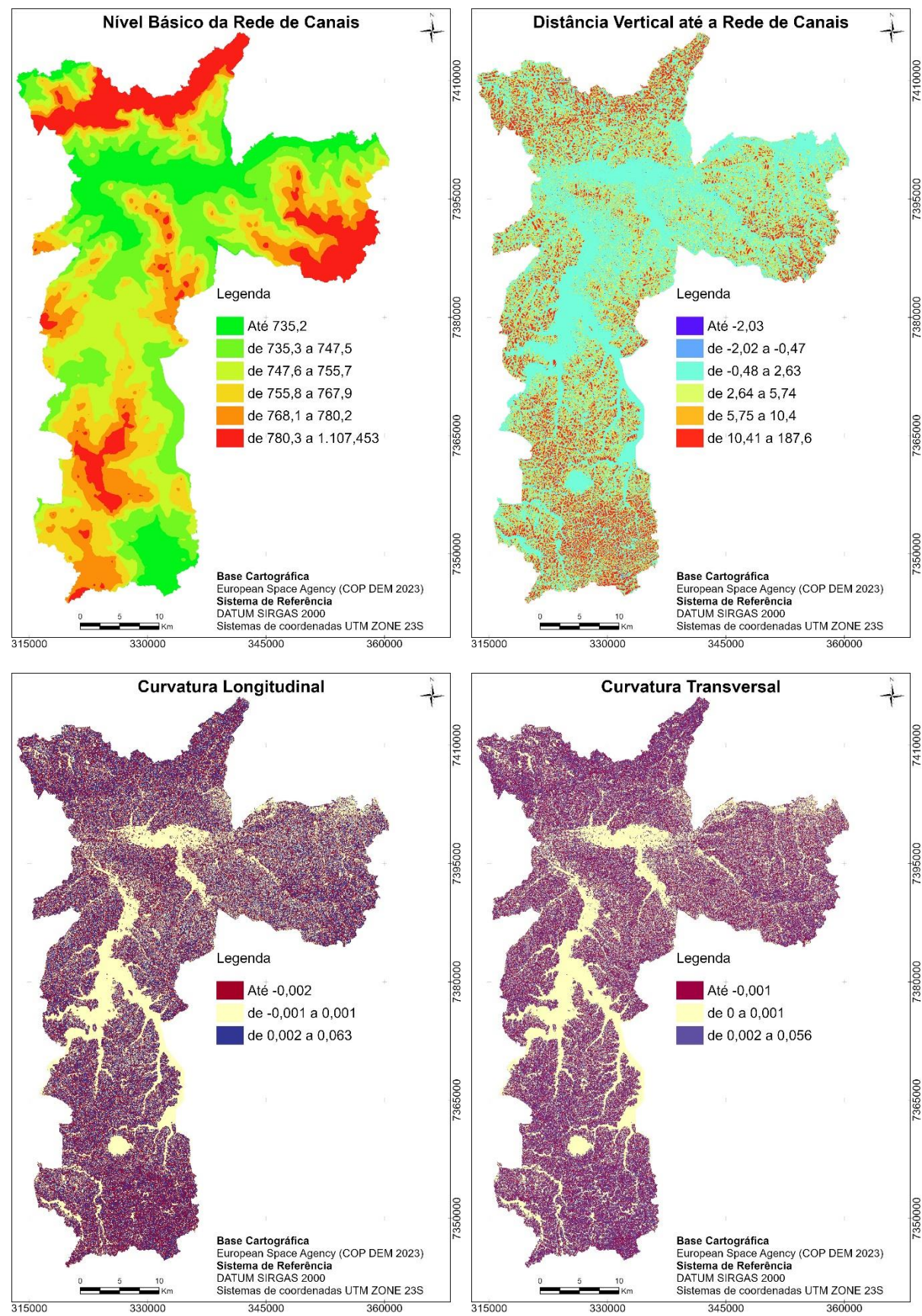
Devido à alta densidade demográfica da área de estudo e a pouca quantidade de vegetação, os parâmetros Uso da Terra e NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) foram descartados, assim como os dados de Geologia e Geomorfologia, por estarem em escala 1:250.000, o que torna a área bastante generalizada. Assim, a conversão destes polígonos para arquivos *Rasters*, altera a qualidade final da imagem gerada pela rede neural, apresentando alto índice de degradação com inúmeros pontos *NODATA*.

Outro fator importante é a aplicação de pesos. Diferente de outros modelos como o *Analytic Hierarchy Process (AHP)* – Modelo Hierárquico Analítico, SAATY (1970), que permite ao pesquisador atribuir pesos aos parâmetros utilizados na elaboração das cartas de perigo, no **módulo r. landslide** este procedimento não é possível. A sua aplicação acontece de forma automática através dos pesos sinápticos. Neste contexto, estes valores (pesos) são calculados pelo módulo a partir do algoritmo de retropropagação, que consiste na avaliação do erro entre a resposta obtida pela propagação e o valor real conhecido da saída (Haykin, 1999).

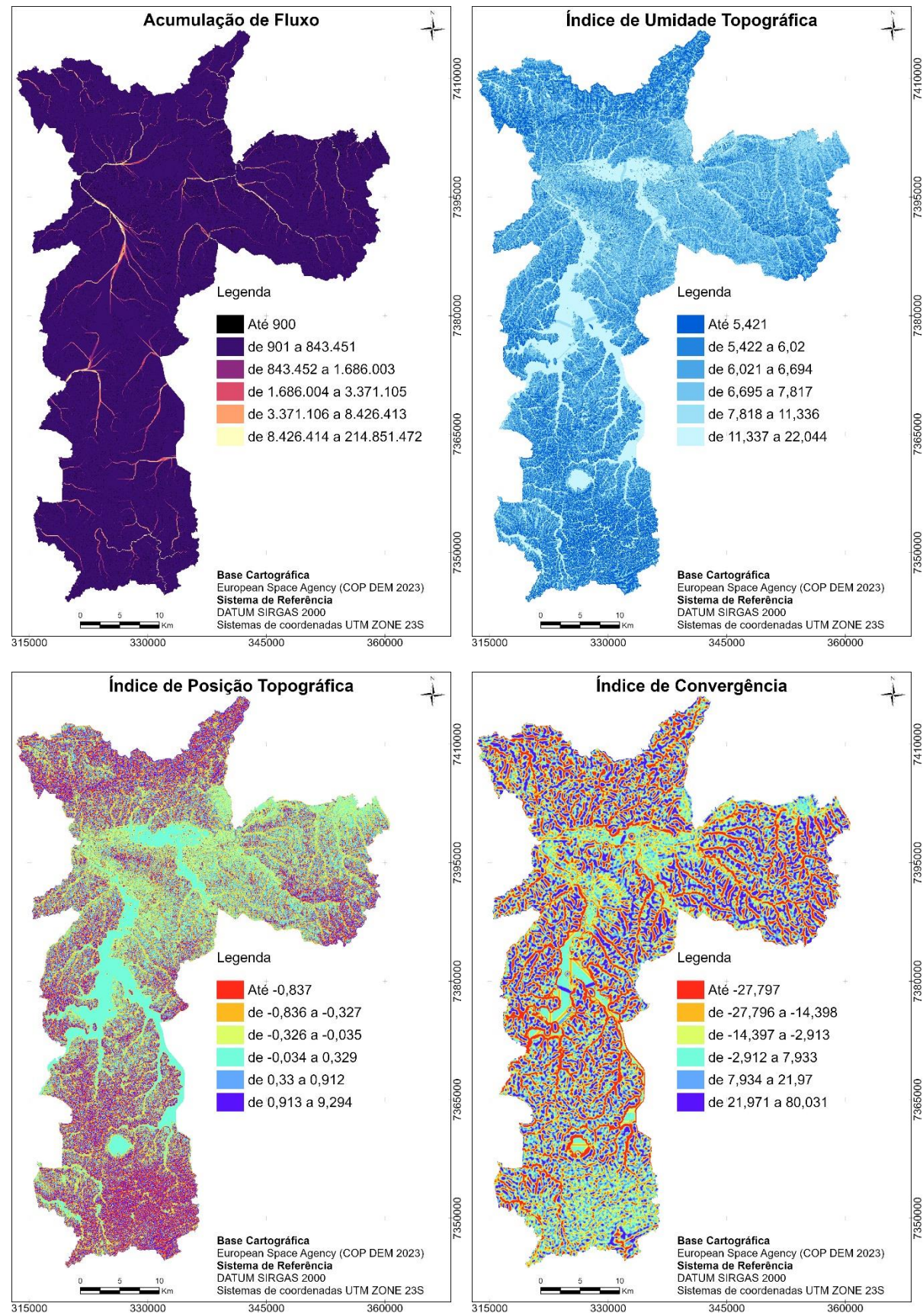
Figura 25 - Parâmetros morfológicos utilizados na elaboração dos cenários de perigo



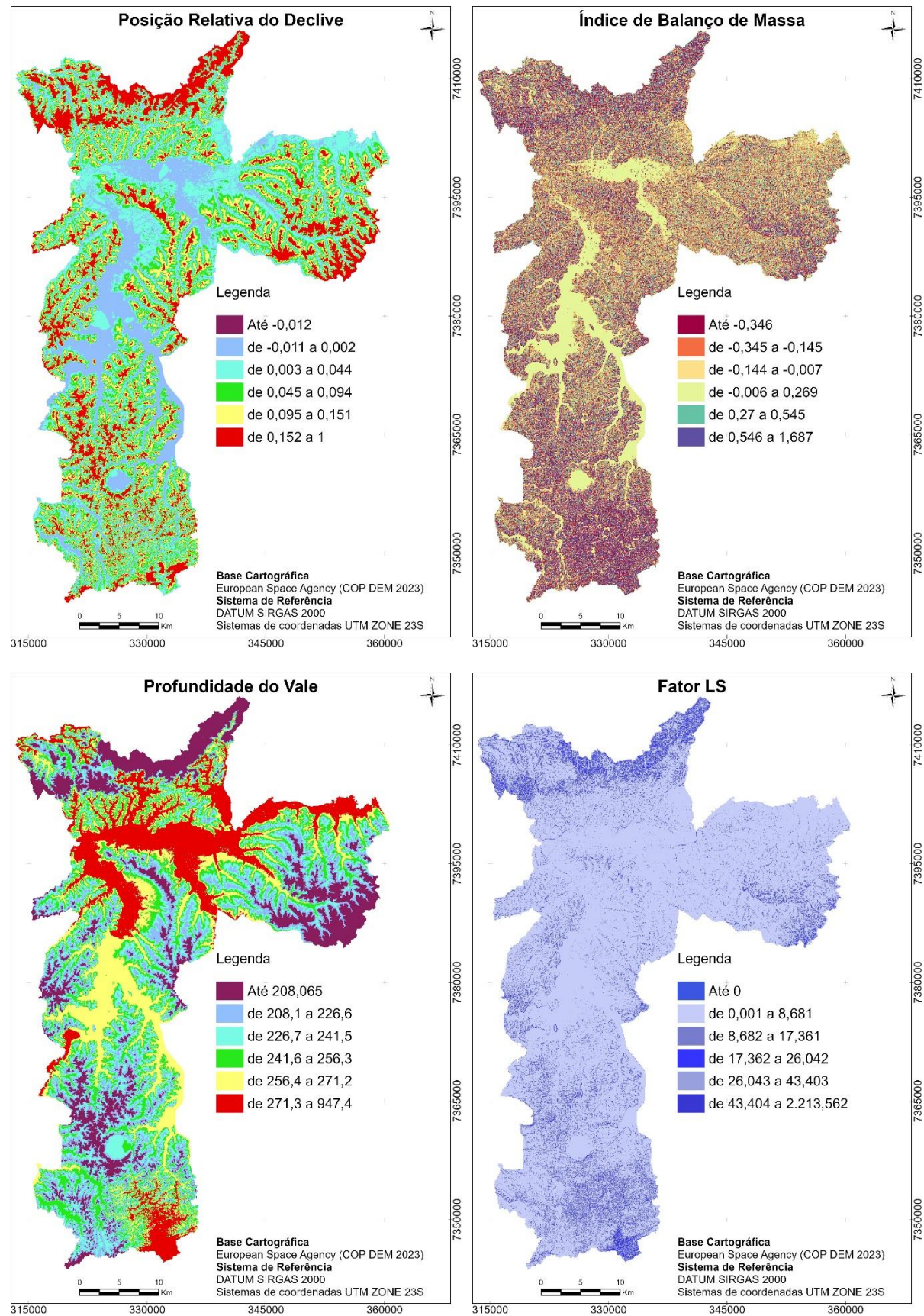
Continuação: Figura 25.



Continuação: Figura 25.



Continuação: Figura 25.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados Copernicus DEM - (COP-DEM) (2023).

Quadro 4 - Definição simplificada dos parâmetros morfológicos

Parâmetros	Nome	Significado	Forma de obtenção	Base de Dados
01	Elevação	Representada em metros, refere-se aos dados de elevação, atuando e intervindo sobre os parâmetros biofísicos (GOMEZ e KAVZOGLU, 2005; QUEVEDO <i>et al.</i> (2019).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
02	Declividade	Fator que representa o ângulo de inclinação da encosta em graus, influenciando diretamente na espessura do solo (METEN <i>et al.</i> , 2015).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
03	Sombreamento Analítico	Simula o sombreamento baseado em valores de iluminação solar na superfície da Terra para fins cartográficos (TZELEPIS <i>et al.</i> 2008).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).

04	Aspecto	Define-se como a direção da inclinação, sendo medido em graus (0 a 360°), pode estar relacionado com o tempo e o clima, em que as encostas viradas a sul recebem mais luz solar do que as que estão viradas a norte (GUILLARD E ZÉZERE, 2012).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
05	Nível Básico da Rede de Canais	Parâmetro essencial para prever a profundidade dos solos influenciados pela vazão das águas subterrâneas (BOCK e KOTHE, 2008).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
06	Distância Vertical até a Rede de Canais	Distância vertical entre a elevação de uma célula e a elevação do canal mais próximo (OLAYA e CONRAD, 2009). Utiliza uma densidade de rede de canais de 5% (OLAYA e CONRAD, 2009).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).

07	Curvatura Longitudinal	Caracteriza como a intersecção com o plano normal da declividade e a direção do aspecto (WOOD, J., 1996).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
08	Curvatura da Superfície Transversal	Intersecta, tangencialmente, o plano definido pela declividade, atuando, perpendicularmente à direção do gradiente máximo (WOOD, J., 1996).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
09	Acumulação de Fluxo	É um parâmetro essencial para diversos tipos de análises hidrológicas e topográficas, como extração e ordenação de rede de drenagem e delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas (ZHOU <i>et al.</i> 2019).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).

10	Índice Topográfico de Umidade	Parâmetro utilizado para indicar o acúmulo de fluxo numa bacia hidrográfica (BEVEN E KIRKBY, 1979; GOMEZ E KAVZOGLU, 2005) ilustra principalmente a variância topográfica sobre os processos hidrológicos (GHASEMIAN <i>et al.</i> , 2022).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
11	Índice de Posição Topográfica	Parâmetro utilizado para estipular a alteração entre a elevação de uma célula e a elevação média calculada para todas as células do MDT (GUISAN <i>et al.</i> , 1999).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
12	Índice de Convergência	Parametriza como a água superficial em uma célula converge ou diverge respectivamente (KÖTHE e LEHMEIER, 1996).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).

13	Posição Relativa do Declive	Posição relativa do declive de uma célula entre o fundo do vale (0) e o topo da crista (1) (BÖHNER E SELIGE, 2006; DENG <i>et al.</i> 2022).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
14	Índice de Balanço de Massa	Parâmetro que expressa o valor entre o acúmulo ou liberação de massa num declive (ZANIN <i>et al.</i> , 2017).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
15	Profundidade do Vale	É calculada como a diferença entre a elevação e um nível de crista interpolado, representando a distância vertical a uma rede de canais de nível de base. (CONRAD, 2012; OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2019a).	Os parâmetros temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
16	Fator LS	É a relação entre o comprimento erosivo	Os parâmetros	Copernicus DEM -

		da encosta e o gradiente da encosta para prever a vulnerabilidade potencial de um local à erosão do solo (OLAYA e CONRAD, 2009).	temáticos foram extraídos utilizando o software SAGA GIS – versão 9.0.2	Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM) (2023).
--	--	--	---	---

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A declividade (Figura 25) é um parâmetro que vincula, de forma direta, o ângulo de inclinação ao ângulo de atrito, a sua permeabilidade e a sua coesão (Yalcin *et al.* 2011; Ding *et al.* 2017). Este parâmetro influencia diretamente na estabilidade da encosta, afetando, de forma direta, na deflagração de escorregamentos de terra (Nefeslioglu *et al.* 2008; Chen *et al.* 2017; Ding *et al.* 2017). As classes de declividade foram baseadas em Ross (1992). O autor aprimorou os intervalos das classes de acordo com a Carta de Capacidade de uso/Aptidão Agrícola, caracterizando-as da seguinte forma: até 6% (muito fraca), de 6% a 12% (fraca), de 12% a 20% (média), de 20% a 30 (forte) e acima de 30% (muito forte).

Para Yalsin (2011), o aspecto (Figura 25) evidencia a disposição das encostas e a sua direção geográfica, sendo considerado, assim como a declividade, um dos fatores causais mais utilizados na elaboração de mapas de escorregamentos (Ercanoglu; Gokceoglu 2002; Ercanoglu *et al.* 2004, Lee, 2005, Bi *et al.* 2014). Nesta pesquisa, o mapa de aspecto foi classificado em graus nas classes Plana (-1), Norte (0 – 22,5), Nordeste (22,5 – 67,5), Leste (67,5 – 112,5), Sudeste (112,5 – 157,5), Sul (157,5 – 202,5), Sudoeste (202,5 – 247,5), Oeste (247,5 – 292,5), Noroeste (292,5 – 337,5) e Norte (337,5 – 360).

Gomez e Kavzoglu (2005) descrevem o índice de umidade topográfica (Figura 25) como uma medida teórica da acumulação de fluxo em qualquer setor de uma bacia hidrográfica, sendo a umidade do solo o fator principal que age afetando o material da encosta, resultando em poropressão, diminuindo assim a estabilidade do solo.

Moore *et al.* (1988) esclarecem que para sua modelagem faz-se necessária a utilização de três variáveis, sendo elas, a área contribuinte de encosta ascendente,

inclinação local da superfície potenciométrica e o aspecto local, que, em conjunto com a inclinação, determina o potencial de radiação solar que incide em qualquer local em uma bacia hidrográfica.

O Fator LS (Figura 25) pode ser considerado como um importante parâmetro que atua no processo de evolução e deflagração dos escorregamentos (Samia *et al.* 2017). Segundo Panagos *et al.* (2015), o fator S mede o efeito da declividade e o fator L determina o impacto de seu comprimento, descrevendo o efeito da topografia na erosão do solo. O Fator LS é um parâmetro utilizado em avaliações de erosão de solos, combinando o comprimento do fluxo e a declividade do terreno (Oliveira *et al.* 2019). Quanto mais elevados forem os seus valores, maior será a declividade e o comprimento da rampa (Quevedo *et al.* 2019).

A distância vertical até a rede de canais (Figura 25) é um parâmetro muito utilizado na construção de mapas de escorregamentos e no apoio ao processo de mapeamento do solo (Möller *et al.* 2012). Em Geoestatística, o parâmetro distância vertical à rede de canais atua como uma variável auxiliar, sendo adequado para prever, por exemplo, a textura do solo (Möller *et al.* 2012).

De acordo com Möller *et al.* (2012), a distância vertical até a rede de canais é caracterizada como a distância vertical à rede de drenagem expressa em metros. O resultado do seu cálculo é a subtração entre a elevação original MDE (Modelo Digital de Elevação) e a interpolação do nível base da rede de canais (Möller *et al.* 2012). Samia *et al.* (2017) apontam que as superfícies que possuem valores mais baixos, estão localizadas próximas às redes de drenagem, do acúmulo de sedimentos e das águas subterrâneas.

Visando um mapeamento de maior acurácia relacionado a perigo a escorregamentos, optou-se para este trabalho a execução do **módulo r. landslide** (BRAGAGNOLO *et al.* 2019).

O presente módulo é uma rede neural artificial gratuita e de código aberto desenvolvida em linguagem Python para mapeamento de suscetibilidade e perigo a escorregamentos de terra (Bragagnolo *et al.* 2019). Consiste em um complemento para o software GRASS GIS (*Geographical Resources Analysis Support System - GRASS Development Team*, 2022). O software GRASS GIS é um dos maiores projetos de Sistema de Informação Geográfica (GIS) de Software Livre e seus usuários podem, além de fazer uma análise interna dos métodos utilizados, entender

sua funcionalidade, modificar os programas para atender às suas necessidades e corrigir ou atualizar os módulos (Neteler; Mitasova, 2008; Neteler *et al.* 2012).

Nesta pesquisa, o **módulo r. landslide** foi utilizado para a produção de dois cenários de perigo a escorregamentos de terra na cidade de São Paulo. Primeiramente a rede neural foi treinada e testada com quantidades diferentes de camadas Raster, a fim de chegar em um modelo adequado, tanto no que tange na questão do desempenho computacional, quanto no resultado esperado.

A validação da rede neural se deu através da sobreposição dos cenários com os dados de escorregamentos, pela análise dos gráficos e pelo valor da área sob a curva (AUC) e da área sob características de operação do receptor (ROC).

O gráfico da Curva Roc (AUC) representando a taxa de verdadeiros positivos e falsos positivos, foi utilizado para a validação da eficácia do **módulo r. landslide**. Swets (1988) aponta que a área sob a curva ROC (AUC), tem o potencial de demonstrar a capacidade de um modelo de previsão, detalhando a eficácia deste sistema em calcular, acertadamente, a ocorrência e não ocorrência de um determinado evento.

Em virtude da grande extensão territorial da cidade de São Paulo, cerca de 1.521,202 km² (IBGE, 2021) e pela intensa urbanização 7.382,6 hab./km² (IBGE, 2010), além da análise pela Curva ROC (AUC), fez-se necessário a realização de trabalho de campo (Figura 26) para validação de alguns pontos de perigo a escorregamentos. As imagens são de áreas pertencentes às subprefeituras de Jaçanã - Tremembé e Campo Limpo, ambas localizações se situam em áreas com alta declividade, sentido indicado pelas setas.

Figura 26 - (A) Fotografia obtida em trabalho de campo realizado no bairro Jardim Corisco na região da subprefeitura de Jaçanã-Tremembé-Zona Norte, e (B) fotografia aérea do bairro do Campo Limpo - Zona Sul obtida durante o sobrevoo de helicóptero realizado no dia 01/12/2021 – São Paulo – SP.

As setas apontam residências em área de perigo a escorregamentos



Fonte: O Autor (2021).

4.2 ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PERIGO

Foram gerados dois cenários de perigo para esta pesquisa (Cenário 1 e Cenário 2) com variações entre os parâmetros morfológicos, de modo a verificar qual deles se aproxima mais da realidade local. Vale ressaltar que a RNA permite uma inserção maior de parâmetros, sendo possível ao usuário alterá-los de acordo com o objetivo de sua pesquisa. Outro fator importante refere-se ao conjunto de pesos, estes são gerados automaticamente pela rede neural, como observado na seção anterior. O resultado (mapa) é obtido a partir dos valores que surgem na camada de saída, que são valores binários definidos em 0 (não escorregamento) a 1 (escorregamento).

A RNA tem como objetivo identificar esses fatores condicionantes a partir de dados de escorregamentos, ou seja, encontrar os padrões pelos quais os escorregamentos ocorrem em uma área em função de parâmetros ambientais temáticos.

Assim, os parâmetros de entrada são inseridos em formato *Raster* com os pontos de escorregamentos e não escorregamentos, sendo convertidos em intervalos [0,1] para normalizar as entradas da RNA. Ressalta-se que além do **conjunto de pesos sinápticos** de cada parâmetro serem gerados, uma **análise de sensibilidade** é fornecida após a conclusão do processo de treinamento da rede neural. A **análise de sensibilidade** (Tabela 01) permite ao usuário distinguir quais parâmetros influenciam mais na identificação de áreas de perigo a escorregamentos.

O número de neurônios ocultos foi estabelecido em 12, a taxa de aprendizagem - calculada nos intervalos entre 0 e 1 - ficou estabelecida em 0.6, o número de épocas para treinamento ficaram em 200 épocas e a proporção dos registros a serem utilizados para treinamento, validação e teste definidos em 70, 15 e 15%, sendo essa a configuração padrão, como demonstrado na figura 09. Assim, o processo de treinamento foi realizado de forma regular e os fatores mais relevantes foram o desempenho, a taxa de desempenho e o número de verificações da taxa de validação.

Para a construção do cenário 01 adotou-se os critérios utilizados por Oliveira *et al.* (2019a), Quevedo *et al.* (2019), Lucchese *et al.* (2020) e Gameiro *et al.* (2022), que são os parâmetros relacionados no capítulo 4.1, de acordo com a Figura 25.

Tabela 1 - Análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada utilizados no Cenário 1 e 2, as linhas selecionadas correspondem aos parâmetros excluídos após verificação da análise de sensibilidade, após a exclusão, os parâmetros restantes foram utilizados para a modelagem do Cenário 2

Parâmetros	Validação de saída (Cenário 1)	Validação de saída (Cenário 2)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Elevação	1,00	1,00	65	1221	777,50	59,96
Declividade	1,00	1,00	0	1,050	0,134	0,117
Sombreamento Analítico	0,99	0,99	0,015	1,753	0,795	0,125
Aspecto	1,00	1,00	-1	360	174,808	108,801
Nível Básico da Rede de Canais	0,99	1,00	64,5	1107,45	757,48	48,92
Distância Vertical até a Rede de Canais	0,99	0,99	-208,778	187,619	4,222	6,170
Curvatura Longitudinal	0,97	X	-0,0746	0,0630	-0,000	0,005
Curvatura da Superfície Transversal	0,99	1,00	-0,067	0,056	0,000	0,004
Acumulação de Fluxo	0,97	X	900	2148	2667	2803
Índice de Umidade Topográfica	0,98	X	2,950	22,043	7,894	3,146
Índice de Posição Topográfica	0,99	0,99	-9,290	9,293	-1,343	0,999
Índice de Convergência	0,97	X	-82,667	80,030	-2,521	24,058
Posição Relativa do Declive	1,00	1,00	-0,805	1	0,0862	0,110
Índice de Balanço de Massa	0,99	0,97	-1,513	1,687	0,0575	0,407

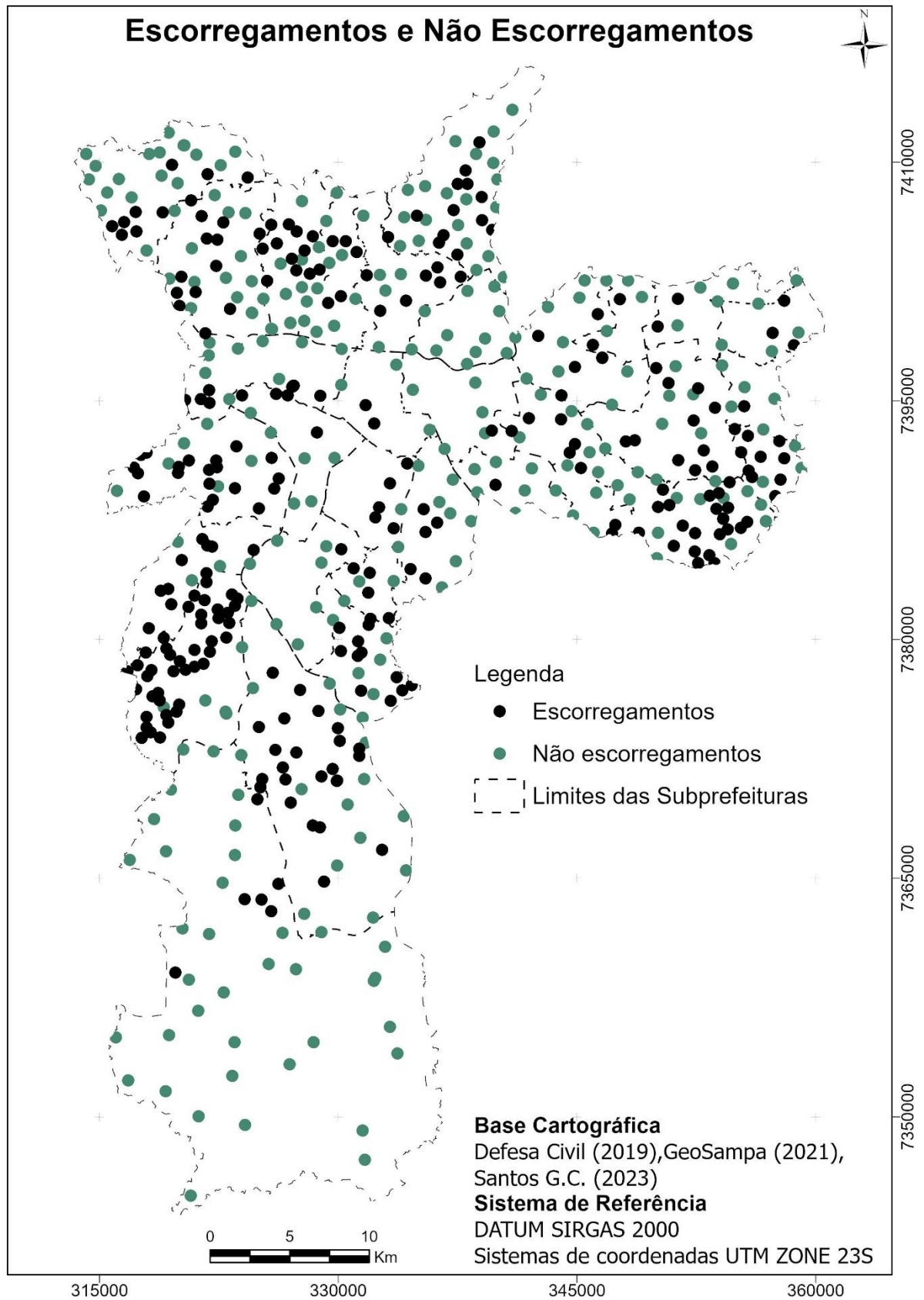
Profundidade do Vale	0,99	1,00	0	947,438	238,774	51,421
Fator LS	0,97	X	0	2213,561	5,802	12,373

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em seguida, foram definidos 273 pontos de escorregamentos e 273 pontos de não escorregamentos (Figura 27), seguindo a proporção 1:1, ou seja, mesmo número de amostras para ambos os parâmetros organizados em dados de treinamento, validação e teste, de acordo com os critérios estabelecidos por Bragagnolo *et. al.* (2019).

De acordo com estes autores, os parâmetros de caráter morfológicos (ex: aspecto, declividade, elevação, índice de umidade topográfica) são utilizados para identificar as áreas de perigo a escorregamentos, além dos pontos de escorregamentos e não escorregamentos.

Figura 27 - Parâmetros de escorregamentos e não escorregamentos utilizados para treinamento, validação e teste



Fonte: Defesa Civil (2019), GeoSampa (2021), o Autor (2023).

Salienta-se que as amostras de não escorregamentos foram definidas a partir do conhecimento prévio quanto a área de estudo. Para tanto, um Modelo Digital de Terreno foi inserido no software QGis, e, a partir de uma análise visual, utilizou-se a ferramenta **Captura de Coordenadas** presente no mesmo software para a aquisição das coordenadas em Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000 – EPSG: 4674, sendo inseridas no Bloco de Notas e convertidas em pontos. Posteriormente as coordenadas foram convertidas para SIRGAS 2000 UTM 23S.

Esta junção de fatores com os eventos de escorregamentos e não escorregamentos, foi crucial, permitindo que a rede neural gerasse um mapa que demonstrasse, em toda a sua extensão, as áreas de perigo a escorregamentos na cidade de São Paulo.

Após a configuração, aplicação dos parâmetros e execução da rede neural, os mapas de perigo em formato Raster, extensão .TIFF foram gerados na saída da rede neural. De posse deste material, os resultados de saída foram analisados e processados no *ArcGIS Pro 3.0.2* utilizando o método Quantil para classificar e criar os mapas de perigo, estabelecendo uma área de cobertura e atribuindo a mesma quantidade de pixels em cada classe, sendo atribuído valores iguais a estas classes, o que permite avaliar e destacar, de maneira linear e ampla, os valores contidos nas extremidades.

Para a classificação das classes de perigo, foi realizada a reclassificação dos Rasters em 6 intervalos em uma escala hierárquica (nulo ou quase nulo, muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto), por meio da ferramenta **Reclassify**, presente no respectivo software. Posteriormente, utilizou a ferramenta **Reporta Camada de Valor Único**, presente no software QGis 3.28.5 - Firenze para extrair as informações textuais em formato .html e a tabela de atributos em formato .xlsx para a confecção dos gráficos presentes nesta pesquisa.

Para a criação do Cenário 2, utilizou-se o critério de análise de sensibilidade estabelecido por Bragagnolo *et. al* (2019), sendo possível a escolha dos parâmetros que exerceram maior influência a escorregamentos, ou seja, aqueles que tiveram resultados de análise abaixo de 0,99 foram excluídos, em um total de 5 parâmetros, como demonstrado na Tabela 01.

Podemos observar que os parâmetros elevação, declividade, sombreamento analítico, distância vertical até a rede de canais, índice de posição topográfica e

posição relativa do declive, obtiveram os mesmos valores em ambos os cenários, já os parâmetros nível básico da rede de canais, curvatura da superfície transversal e profundidade do vale, obtiveram valor 1,00 no Cenário 2 e 0,99 no Cenário 1. Apenas o parâmetro índice de balanço de massa obteve valor mais baixo no Cenário 2, com 0.97 ante os 0,99 do Cenário 1.

Neste sentido, a inserção das amostras permite que a rede neural aprenda as diferentes combinações entre os parâmetros que possuem determinada relevância na deflagração de escorregamentos entre aqueles que exercem menos influência.

4.3 ELABORAÇÃO DO MAPA DE INVENTÁRIO (ESCORREGAMENTOS)

Os mapas de inventários de escorregamentos sobressaem-se como um dos modelos de mapeamento de escorregamentos, podendo validar com precisão a localização precisa destes eventos e sua relação com os agentes deflagradores, como a geologia e a declividade, entre outros (Guzzetti *et al.*, 2000; Guzzetti *et al.*, 2002).

A elaboração do mapa de inventário de escorregamentos utilizado neste trabalho foi feita a partir dos dados históricos de escorregamentos ocorridos entre 2012 e 2022 cedidos gratuitamente pela Defesa Civil do Município de São Paulo em formato tabular (.xlsx) (Quadro 05). No entanto, a partir de uma análise mais apurada dos dados e da quantidade de eventos ocorridos, optou-se pelos dados do ano de 2019 para a formulação do inventário. A escolha se deu pela quantidade de escorregamentos ocorridos na cidade de São Paulo naquele ano.

Nas respectivas tabelas de ocorrências estão inseridos dados como: **data e hora**, **serviço** (escorregamento), **logradouro**, **latitude e longitude** (Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000 – EPSG: 4674, posteriormente convertidas para SIRGAS 2000 UTM Zone 23S) e **caixa de resolução** com o nome da respectiva subprefeitura onde ocorreram os escorregamentos.

Quadro 5 - Recorte da tabela de ocorrências cedida de Defesa Civil de São Paulo. As células em destaque contêm os dados referentes à Figura 1 e à Figura 2

Data e Hora	Serviço	Logradouro	Latitude	Longitude	Caixa de Resolução
03/01/2019 10:43:28	Escorregamento	Rua Paulo Lacombe	- 23,4191349	-46,71959	SMSU-Defesa Civil -Perus

04/01/2019 09:48:56	Escorregamento	Rua Silvestro Palma	- 23,4839692	- 46,7639608	SMSU-Defesa Civil -Pirituba/Jaraguá
05/01/2019 01:10:47	Escorregamento	Rua dos Três Espaços	- 23,8697122	-46,770088	SMSU-Defesa Civil - Parelheiros
08/01/2019 17:07:20	Escorregamento	Rua Vergueiro	- 23,6085102	- 46,6136787	SMSU-Defesa Civil - Ipiranga
09/01/2019 12:35:44	Escorregamento	Rua Botuporã	- 23,5415276	- 46,4439656	SMSU-Defesa Civil - Itaquera
11/01/2019 16:18:39	Escorregamento	Rua Gastão do Rêgo Monteiro	- 23,5794169	- 46,7410513	SMSU-Defesa Civil - Butantã
18/01/2019 15:00:13	Escorregamento	Rua Manuel Bordalo Pinheiro	- 23,6606594	- 46,7572138	SMSU-Defesa Civil - M'Boi Mirim
18/01/2019 18:23:43	Escorregamento	Rua Marcos Tadeu Gouveia	- 23,6559305	- 46,7553524	SMSU-Defesa Civil - Campo Limpo
24/01/2019 07:33:26	Escorregamento	Rua Morro Crispim da Costa	- 23,4460067	- 46,7054361	SMSU-Defesa Civil - Freguesia do Ó/Brasilândia
28/01/2019 11:05:18	Escorregamento	Travessa Baco	- 23,4759969	- 46,6105481	SMSU-Defesa Civil - Santana/Tucuruvi
30/01/2019 17:10:16	Escorregamento	Rua Condessa Amália Matarazzo	- 23,4620396	- 46,6531334	SMSU-Defesa Civil - Casa Verde/Cachoeirinha
08/02/2019 06:32:44	Escorregamento	Estrada Canal de Cocaia	-23,739381	- 46,6668998	SMSU-Defesa Civil -Capela do Socorro
16/02/2019 18:25:32	Escorregamento	Rua Miguel Fernandes	- 23,6209725	- 46,4184505	SMSU-Defesa Civil -São Mateus
30/05/2019 09:22:17	Escorregamento	Avenida Miguel Estéfano	- 23,6423617	- 46,6221308	SMSU-Defesa Civil -Ipiranga

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da Defesa Civil de São Paulo.

A conversão das tabelas em arquivos *shapefile* de pontos se deu em ambiente *SIG ArcGis Pro 3.0.2* através da caixa de ferramentas **Geoprocessing/Data Management Tools/Projections and Transformations/Convert Coordinate Notation**. Esta ferramenta permite a inserção direta da tabela em formato .xlsx sem precisar convertê-la em .csv. Após a compilação dos dados em formato *shapefile*, o mapa de inventário foi elaborado com os pontos de ocorrências na cidade de São Paulo (SP).

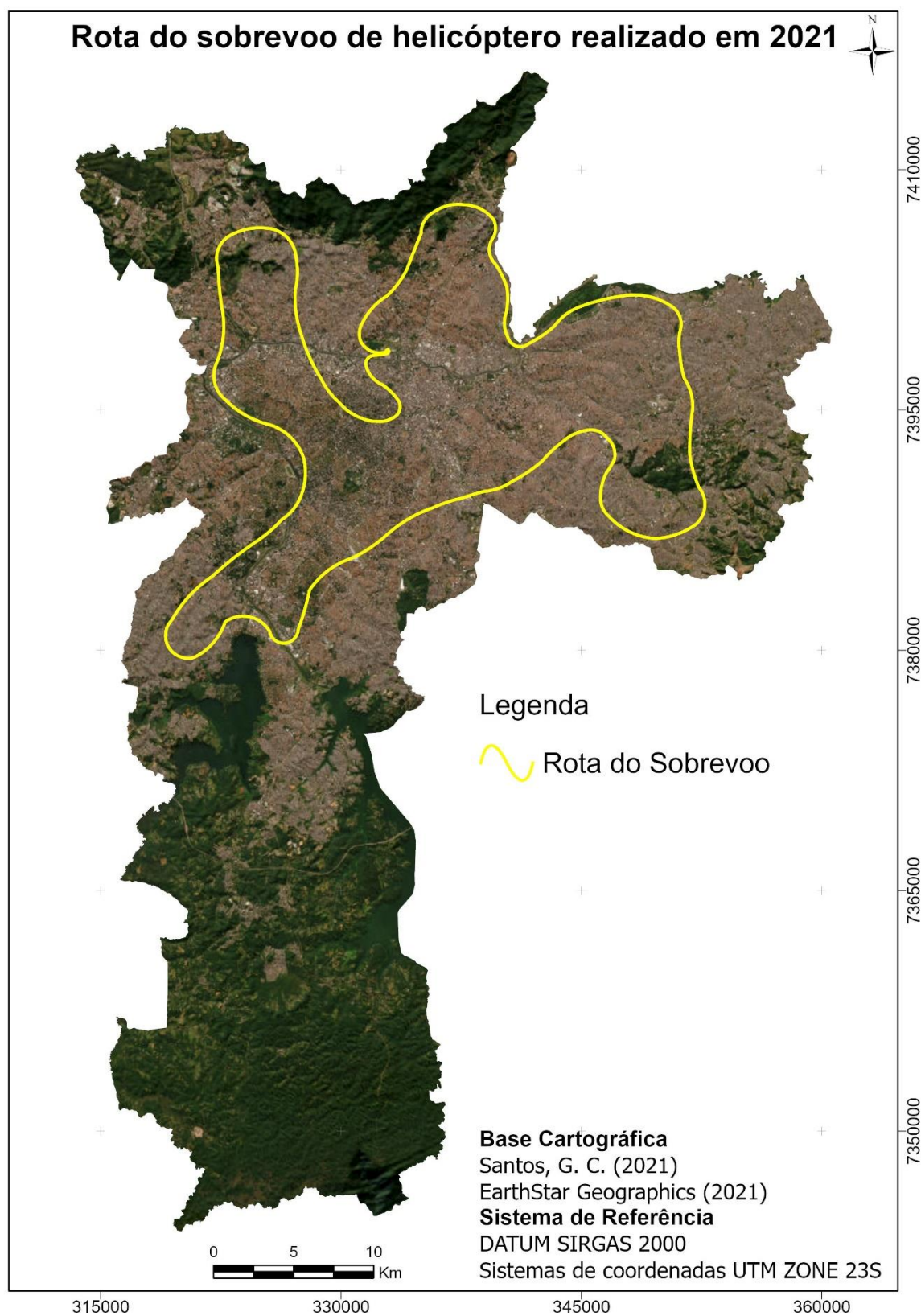
Após a conversão da tabela 2019 em *shapefile* de pontos, foi realizada uma análise visual em cada campo da tabela de atributos correspondentes aos escorregamentos, o que tornou possível a verificação de geometrias duplicadas. Para a remoção destas geometrias, foi utilizada a ferramenta **Excluir Geometrias Duplicadas**, presente no software QGis. Assim, de um total de 515 pontos de escorregamentos propostos pela Defesa Civil de São Paulo, restaram apenas 433 pontos.

A partir da sobreposição destes pontos de escorregamentos com o Modelo Digital de Terreno, outros pontos foram excluídos, haja vista estarem localizados em áreas não propensas a escorregamentos, como planícies inundáveis e fundos de vales. Este procedimento fez-se necessário para a inserção e execução da rede neural.

Visando um mapeamento de áreas de perigo a escorregamentos na cidade de São Paulo, além dos trabalhos de campo via terrestre, foi realizado um sobrevoo de helicóptero de baixa altitude para obtenção de imagens aéreas oblíquas (Figura 28). Percorreu-se praticamente toda a extensão territorial da cidade, concentrando-se em suas áreas periféricas seguindo uma setorização previamente elaborada (zonas norte, leste, sul e oeste) (Figura 29).

É importante ressaltar que os escorregamentos que ocorrem na cidade de São Paulo são de caráter antrópico, seja por cortes no relevo para construção de residências, para construção de prédios residenciais ou não, cortes no relevo para construção de estradas, arruamentos, pelo uso de água servida. Outro fator relevante é que, devido à cidade de São Paulo ser de extremo adensamento populacional, tornou-se impossível a identificação destes escorregamentos por imagens de satélite, Google Earth etc.

Figura 28 - Mapa da rota do sobrevoo de helicóptero realizado no mês de dezembro de 2021 para a obtenção de imagens aéreas oblíquas de áreas de risco existentes na cidade de São Paulo



Fonte: O Autor (2021), Earthstar Geographics (2021).

Figura 29 - Exemplo de fotografia aérea obtida durante o sobrevoo de helicóptero realizado no dia 02/12/2021 – São Paulo (SP). Na imagem, as setas apontam casas em local de intensa vulnerabilidade e obra de contenção de encosta – Vila Dania Mungo Park – Zona Leste – São Paulo



Fonte: O Autor (2021).

4.4 VALIDAÇÃO

Além da construção dos dois cenários de perigo a escorregamentos, foi necessário validá-los a fim de demonstrar a sua autenticidade, ou seja, a validação busca demonstrar se de fato o modelo final resultou em dados consistentes e autênticos.

É importante destacar que há outras formas de validação, como a Correlação de Pearson, Matriz de Confusão, Índice de Concentração, dentre outros, porém, nesta pesquisa, foram considerados a Frequência de Distribuição (Gao, 1993) e a Curva ROC (Swets, 1988).

Para tal finalidade, o inventário de pontos correspondentes aos escorregamentos foi sobreposto aos cenários 1 e 2. Em seguida, a Frequência de Distribuição das classes de perigo foram calculadas em porcentagem para cada cenário. Após esta etapa, os cenários foram validados utilizando a curva ROC. Para

tanto, os cenários foram inseridos na *ToolBox ARCSDM* (Sawatzky; Bonham-carter, 2010) para ArcGis Pro, juntamente com o inventário de escorregamentos (Verdadeiro Positivo) e não escorregamentos (Falsos Positivos).

Para Bradley (1997), a curva ROC, reflete, continuamente, as mudanças ocorridas na sensibilidade e na qualidade dos dados, sendo uma composição de matrizes de confusão sob diferentes extremidades, muito difundida e utilizada em estudos e pesquisas relativas a escorregamentos utilizando redes neurais artificiais (Wang *et al.* 2019).

Yesilnacar e Topal (2005) e Yilmaz (2009) acrescentam que para um indicador ser ideal, a AUC tem que variar de 0.5 a 1. No entanto, Swets (1988) define que os valores de acurácia obtidos com AUC superiores a 0.9, são considerados excelentes e altamente precisos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

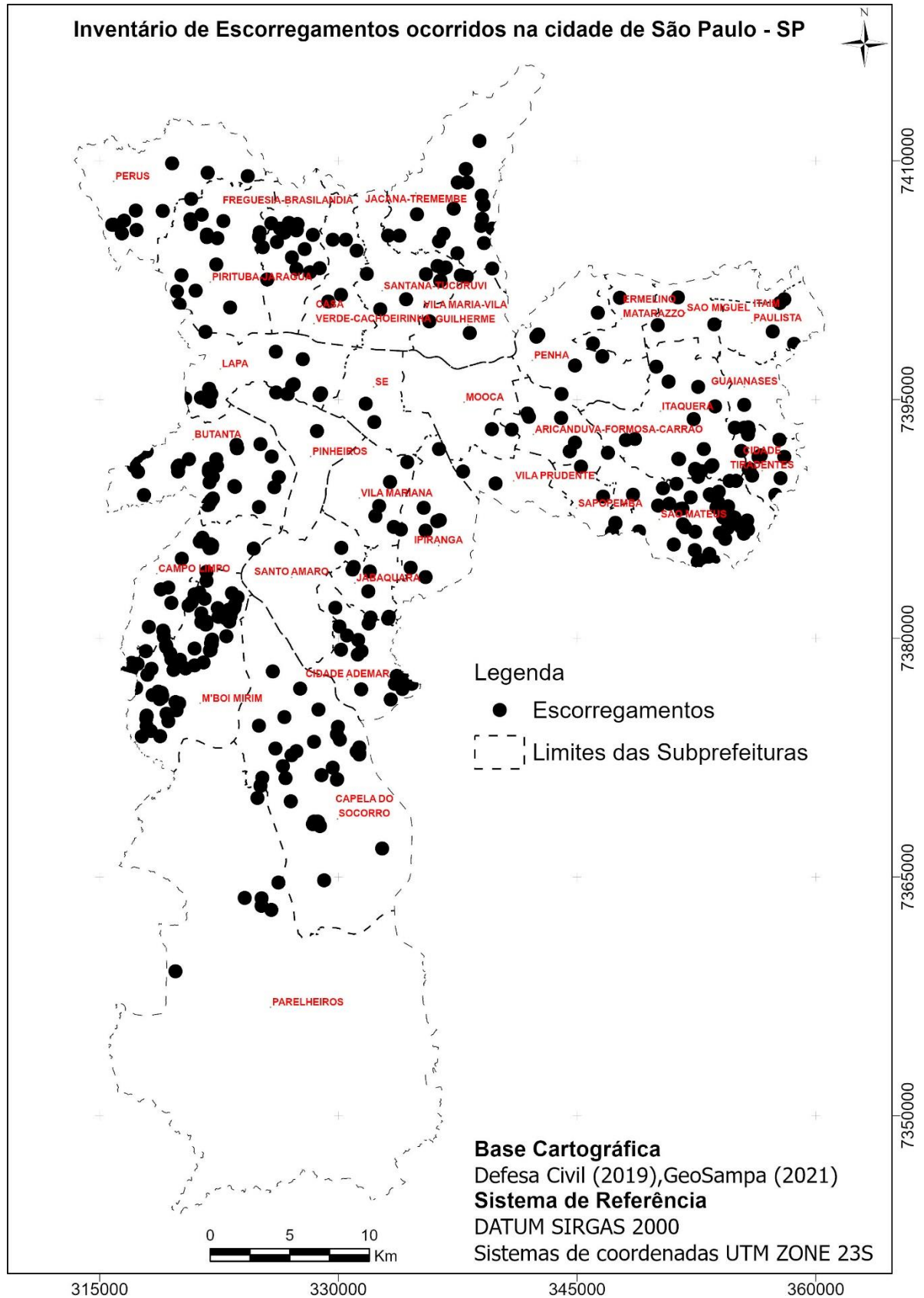
Este capítulo apresenta os resultados e discussões obtidos nesta pesquisa: (5.1) Inventário de escorregamentos; (5.2) Cenários de perigo; (5.3) Validação dos cenários de perigo e análise de desempenho do **módulo r. landslide**.

5.1 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Oliveira *et. al* (2019) apontam que as metodologias baseadas em inventários são condições primordiais para todas as outras metodologias, na medida em que fornecem a entrada de maior relevância e são aplicadas para validar os mapas resultantes, gerados a partir de inventários com base em registros históricos (Guzzetti *et al.* 2000; Jaiswal; Van Westen, 2009).

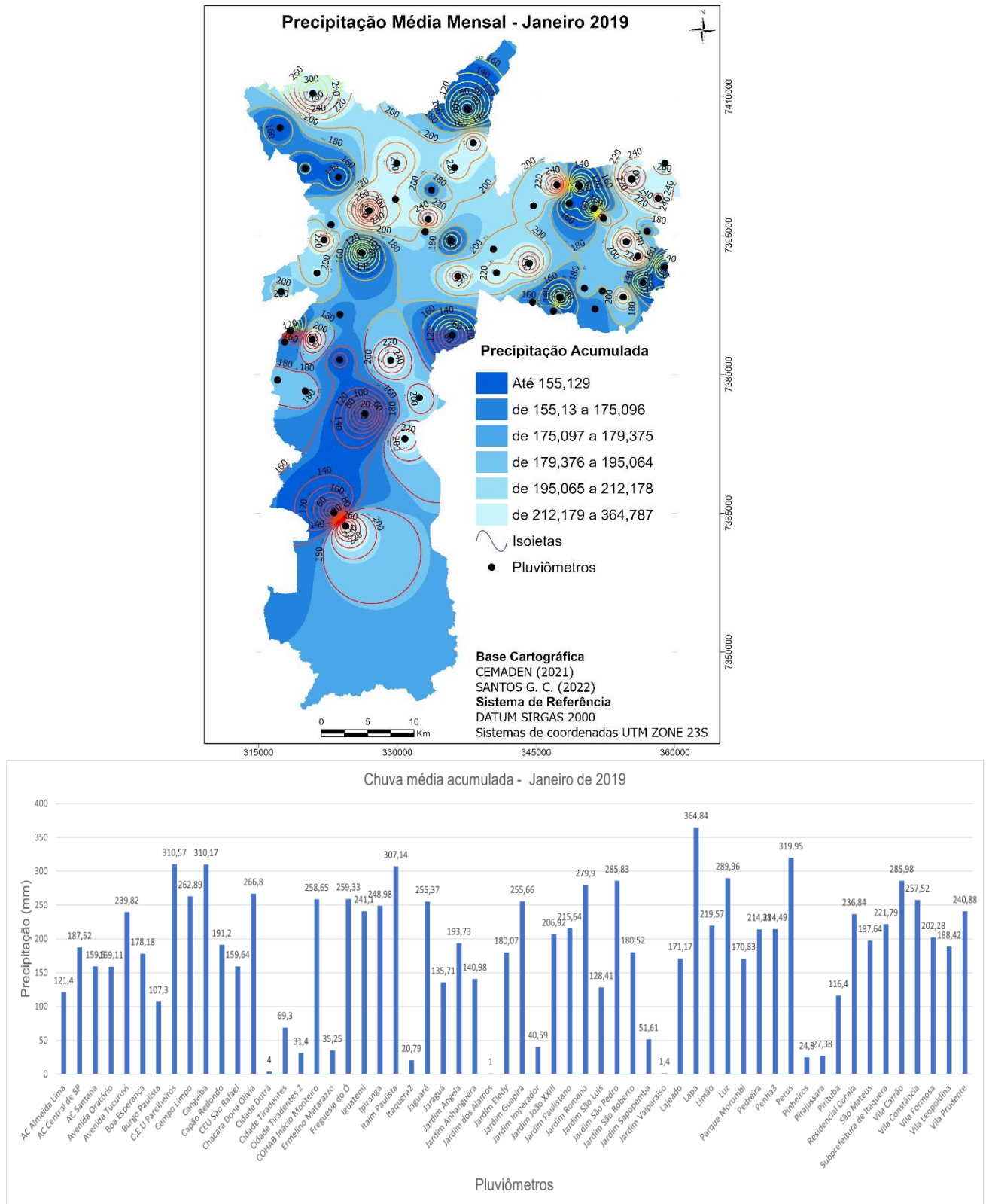
Partindo deste pressuposto, foram mapeadas 433 ocorrências de escorregamentos na cidade de São Paulo. Como explicitado anteriormente, os dados históricos de escorregamentos escolhidos foram os do ano de 2019 devido a quantidade de ocorrências de eventos geodinâmicos (Figura 30). Em sua maioria, os escorregamentos foram registrados entre os meses de janeiro (Figura 31) a março, que é o período mais chuvoso na cidade de São Paulo.

Figura 30 - Inventário de escorregamentos ocorridos na cidade de São Paulo – SP



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da Defesa Civil (2019) – SP e GeoSampa (2021).

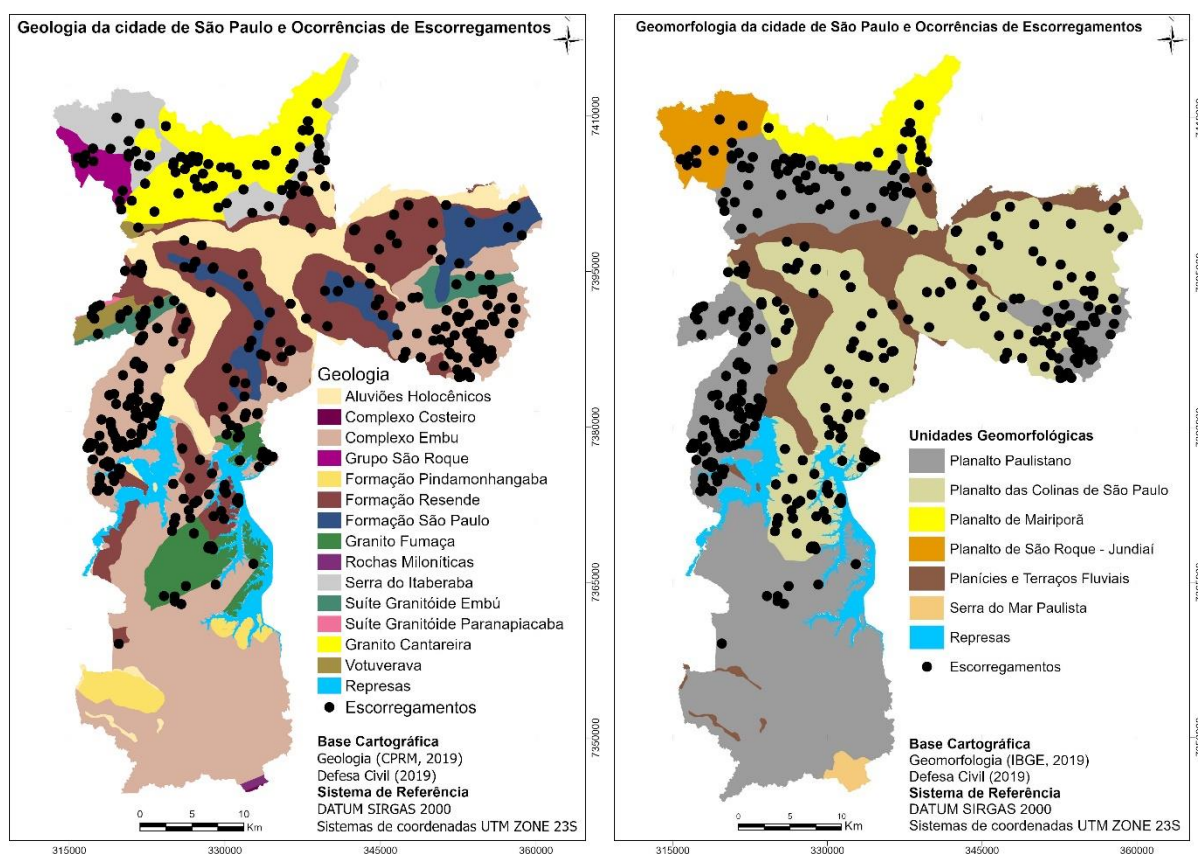
Figura 31 - Mapa de isoietas e gráfico de chuva média acumulada ocorrida na cidade de São Paulo no mês de janeiro de 2019



Fonte: Elaborado pelo autor a partir da interpolação de dados de chuva cedidos pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) (2021).

Sobrepondo o inventário de escorregamento com os mapas de Geologia e Geomorfologia (Figura 32), podemos observar que as ocorrências se deram em quase todas as unidades geológicas com exceção das unidades pertencentes aos Aluviões Holocênicos e ao Complexo Costeiro. As áreas mais afetadas estão situadas nas unidades do Complexo Embu, Serra de Itaberaba, Granito Cantareira e áreas localizadas nas Formações Resende e São Paulo, pertencentes ao Grupo Taubaté.

Figura 32 - Mapas de Geologia e Geomorfologia com os pontos de escorregamentos sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da CPRM (2019); Defesa Civil (2019); IBGE (2019).

Devido a sua altitude e declividade, as três primeiras unidades são consideradas por Rodriguez (1998) como de alta probabilidade de ocorrências de escorregamentos. Apenas a Formação Resende é considerada de baixa a média potencialidade por localizarem em encostas e colinas de relevos suavizados, no entanto, devido ao adensamento populacional nestas áreas, os escorregamentos ocorrem, exclusivamente, pela atividade antrópica, como em cortes no relevo e descarte de materiais.

No contexto geomorfológico, os escorregamentos ocorreram em bairros situados em quase todas as unidades de relevo que formam a cidade de São Paulo

com exceção da unidade pertencente à Serra do Mar Paulista. Assim, destacam-se as unidades pertencentes ao Planalto Paulistano, Planalto das Colinas de São Paulo, Planalto de Mairiporã e Planalto de São Roque – Jundiaí.

Todas essas áreas estão localizadas em altitudes entre 750 e 1200 metros de altitude, como as localizadas na região do Morro do Cruzeiro, na Zona Leste com 975 m de altitude, Morro da Lua, na Zona Sul com 850 metros de altitude e Serra da Cantareira, na Zona Norte, com elevações acima de 1200 metros de altitude com intensa ocupação antrópica, ausência de políticas públicas habitacional e urbana, e moradias feitas em condições precárias.

Percebe-se que a concentração de escorregamentos se localiza nos bairros periféricos altamente populosos como os de São Mateus, Cidade Tiradentes, Parque São Rafael, Sapopemba, Jaçanã, Tremembé, Brasilândia, Grajaú, Capão Redondo, Campo Limpo, que, de acordo com IBGE (2022), contêm, 155.682, 194.177, 148.145, 266.715, 87.329, 196.563, 243.273, 384.873, 270.767, 236.162 mil habitantes, respectivamente nessa ordem, entre outros.

Por este motivo, os escorregamentos que ocorrem nestas áreas podem não ser induzidos exclusivamente pela chuva, mas também pelas ações antrópicas, que agem alterando a paisagem, causando consequências geológico-geomorfológicas referentes aos relevos tecnogênicos; criando, induzindo, intensificando ou modificando o comportamento dos processos referentes à dinâmica externa e na criação de depósitos superficiais correlatos (Pellogia, 1997).

Neste cenário, o perigo a escorregamentos é o resultado dos cortes nos morros e encostas para construção de residências em áreas impróprias para a ocupação humana (Figura 33), onde o perigo potencial existente é inerente à formação geológica-geomorfológica destas áreas (Pellogia, 1997; Rodriguez, 1998).

Figura 33 - As imagens correspondem a exemplos de cortes em relevos para construção de residências. Na figura A, obra de contenção em cicatriz de escorregamento ocorrido em corte de relevo para construção de moradias no Jardim Corisco, Zona Norte de São Paulo. Na figura B, a seta indica corte em relevo para construção de moradia na região do Jardim Damasceno, Zona Norte de São Paulo



Fonte: O Autor (2021).

Em pesquisa relacionada às redes neurais artificiais e inventário de escorregamentos, Oliveira *et al.* (2019) elaboraram um inventário de escorregamentos a partir da interpretação e vetorização de imagens obtidas por sensoriamento remoto, atreladas à pesquisa de campo entre os anos de 2016 e 2017 para identificação e validação das cicatrizes de escorregamentos rasos nas bacias dos rios Fão e Forqueta (RS). A partir de uma inspeção visual no software Google Earth, os autores encontraram 121 cicatrizes de escorregamentos em área remota à montante das cabeceiras de drenagens, entre as cidades de Fontoura Xavier, Barros Cassal, Soledade e Progresso, ambas pertencentes ao estado do Rio Grande do Sul. Ressalta-se que a elaboração do inventário realizado pelos autores, difere da elaboração do inventário desta pesquisa, que foi realizado a partir das tabelas cedidas pela Defesa Civil de São Paulo.

Bragagnolo *et al.* (2021) aplicaram a arquitetura de uma RNA U-Net para identificar cicatrizes de escorregamentos a partir de imagens de satélite na região do Nepal. A RNA foi treinada para ajustar os parâmetros com base nestas imagens, incluindo as máscaras relacionadas às cicatrizes. A composição do banco de dados das imagens fora embasada visualmente nas imagens do software Google Earth e nas coordenadas das ocorrências. Também foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 e suas máscaras criadas no software GRASS GIS 7.6.0. Assim como nesta pesquisa, a localização dos escorregamentos foi feita a partir de um banco de dados contendo as coordenadas geográficas e datas dos eventos geodinâmicos ocorridos.

Da mesma forma, a RNA utilizada foi executada a partir do software GRASS GIS (versão 8.3.2), assim como a inserção dos parâmetros e suas respectivas máscaras. No entanto, foi impossível a visualização das cicatrizes a partir do Google Earth Pro, haja vista a intensa urbanização da cidade de São Paulo, como destacado anteriormente.

5.2 CENÁRIOS DE PERIGO

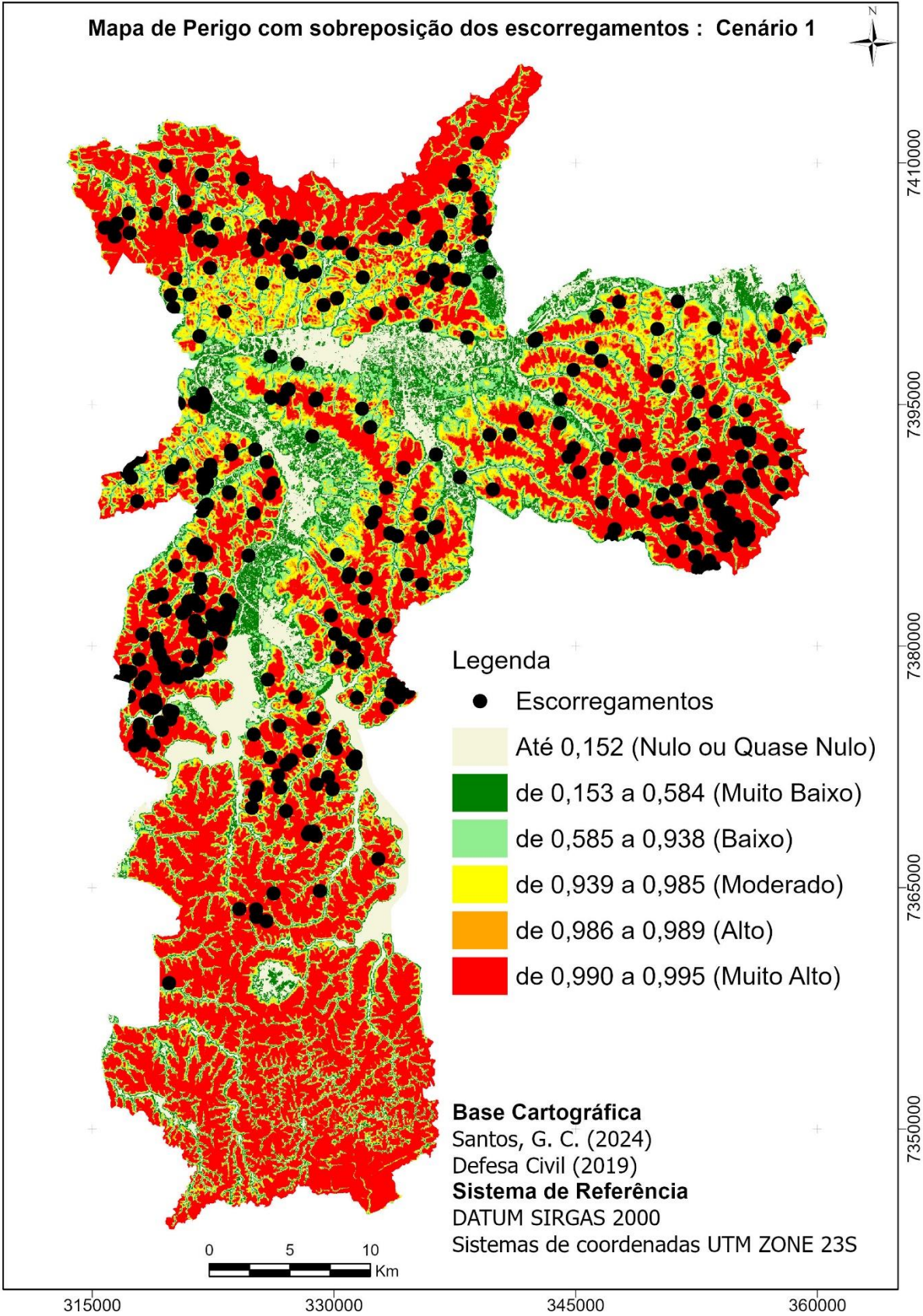
5.2.1 *Cenário 01*

Como antes mencionado, foram distribuídas seis classes de perigo a escorregamentos, sendo elas nulo ou quase nulo, muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto utilizando apenas parâmetros morfológicos, levando em consideração todo o limite territorial da cidade de São Paulo, incluindo as áreas com baixo adensamento populacional, como as localizadas no extremo sul da cidade.

No Cenário 1 (Figura 34) destaca-se a classe de perigo muito alto, apresentando frequência de distribuição (Figura 35) de 52,03%, ou seja, de acordo com o mapa gerado pela RNA, mais da metade da cidade se encontra em áreas de perigo a escorregamentos. Em seguida, as áreas de perigo muito baixo, com frequência de distribuição de 19,91% e baixo com frequência de distribuição de 18,06%. As áreas de perigo moderado obtiveram frequência de distribuição de 6,33% enquanto nas áreas de perigo alto foram percebidas frequência de distribuição de 3,66%. As classes de perigo nulo ou quase nulo apareceram com frequência de distribuição de 0,01%, sendo estas caracterizadas em áreas de baixa ou sem nenhuma declividade, como áreas de várzeas.

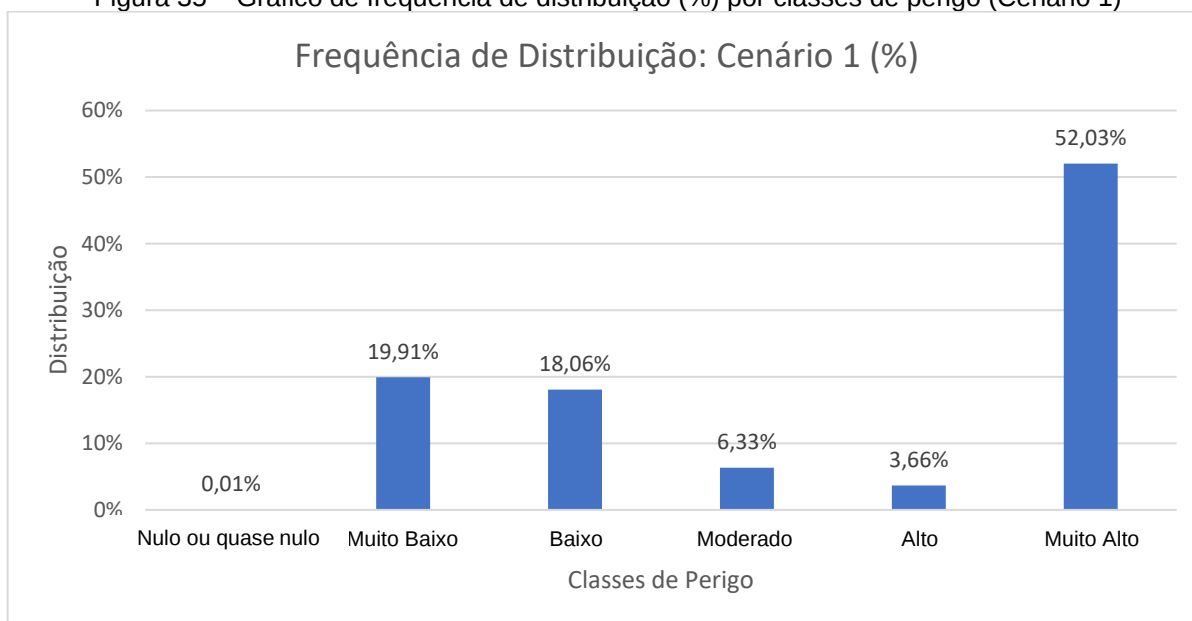
Os resultados de saída da rede neural para o Cenário 1 variaram entre 0,152 e 0,995; como já destacado, valores próximos a 1 indicam maior probabilidade de ocorrência de escorregamentos, enquanto valores próximos a 0 apontam baixa probabilidade.

Figura 34 - Mapa de perigo do **Cenário 1** com pontos de ocorrências de escorregamentos sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 35 – Gráfico de frequência de distribuição (%) por classes de perigo (Cenário 1)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Na Zona Norte, as áreas de perigo muito alto estão localizadas na região das subprefeituras do Jaçanã - Tremembé, Santana – Tucuruvi, Vila Maria – Vila Guilherme, Freguesia do Ó - Brasilândia, Perus e Pirituba – Jaraguá. Bairros como Jardim Corisco I e II, Jardim Damasceno, Parada de Taipas e Sítio Botusquara estão situados nas áreas de alta declividade da Serra da Cantareira e possuem um alto índice de residências construídas em topos de morros, apresentando um índice elevado de escorregamentos correlacionados com os dados da Defesa Civil de São Paulo.

Na Zona Leste, as áreas mais atingidas estão concentradas nas subprefeituras de Aricanduva – Formosa – Carrão, Cidade Tiradentes, Guaianases, Itaquera, São Mateus, Sapopemba. São áreas de altitudes elevadas e com altas concentrações de escorregamentos. São exemplos o Parque Savoy City, Jardim Iguatemi, Favela Palanque, Recanto Verde do Sol, Parque São Rafael, Fazenda da Juta, Jardim Elba, entre outros.

Na Zona Sul, as subprefeituras mais afetadas são as do Ipiranga, Jabaquara, Cidade Ademar, Capela do Socorro, M'Boi Mirim, Campo Limpo e Parelheiros. Bairros como Capão Redondo, Jardim Ângela, Jardim São Luís, Vila das Belezas, Parque Pirajussara estão localizados em áreas de alta declividade e, assim como nas outras regiões citadas, possuem imóveis autoconstruídos e elevado adensamento

populacional. Somente a região da subprefeitura de Parelheiros apresentou baixa concentração de escorregamentos.

Na Zona Oeste, apenas os bairros de Vila Sônia e Vila Andrade, situados na região da subprefeitura do Butantã, apresentaram um alto índice de escorregamentos.

É importante ressaltar que mesmo em áreas localizadas próximas à região central da cidade, a exemplo os bairros de Vila Mariana, Paraíso (áreas pertencentes à bacia do Córrego Ipiranga), apresentam elevadas concentrações de áreas de perigo muito alto, porém com baixo índice de escorregamentos. Este fator pode estar relacionado aos padrões de construções e à atuação do poder público em relação a estes bairros.

Em relação aos parâmetros utilizados, os de maior relevância na construção do **Cenário 1** foram os morfológicos elevação, declividade, aspecto e posição relativa do declive, ambos com grau de sensibilidade equivalente a 1, índice de balanço de massa, índice de posição topográfica, sombreamento analítico e curvatura da superfície transversal e profundidade do vale, nível básico da rede de canais e distância vertical até a rede de canais, ambos com 0,99.

Correlacionando a classe de perigo muito alto com os parâmetros temáticos, as classes de perigo a escorregamentos na cidade de São Paulo estão localizadas em áreas de maiores altitudes e com declividades acentuadas e vales profundos com extensa rede de drenagem, como na região Norte de São Paulo, mais precisamente na Serra da Cantareira, onde os escorregamentos ocorreram entre 750 e 950 metros de altitude, com as encostas voltadas para o sul e sudeste, o que representa, pela sua posição, um maior acúmulo de água durante fortes precipitações devido a sua altitude e sua orografia.

Assim como na região Norte, as áreas de perigo muito alto têm grande concentração nas regiões Leste e Sul. São áreas localizadas nas extremidades da cidade com intensa densidade demográfica. Neste cenário, as ocorrências de escorregamentos ocorreram entre 750 e 900 metros de altitude e em locais de altas declividades, principalmente nas áreas localizadas no Morro do Cruzeiro, próximo à nascente do Rio Aricanduva, na Zona Leste e no Morro da Lua, no bairro de Campo Limpo, Zona Sul. As incidências de escorregamentos ocorreram com menos amplitude na Zona Oeste pela presença dos fundos de vale dos rios Pinheiros, Pirajussara e

Tietê, corroborando com as divisas entre a cidade de São Paulo e outras cidades da RMSP.

Neste caso, observa-se que as classes de perigo muito alto foram expressivas em toda a extensão territorial da cidade de São Paulo, estando estas classes concentradas nas extremidades das zonas Norte, Sul, Leste, parte da Oeste e em alguns bairros da região central (Figura 36).

Figura 36 - Moradias autoconstruídas em local com declividade acentuada e em situação de perigo a escorregamentos muito alto localizadas no bairro Jardim Elba, Zona Leste (A) e Jardim Vista Alegre (B), Zona Norte de São Paulo. As setas amarelas indicam a direção da encosta



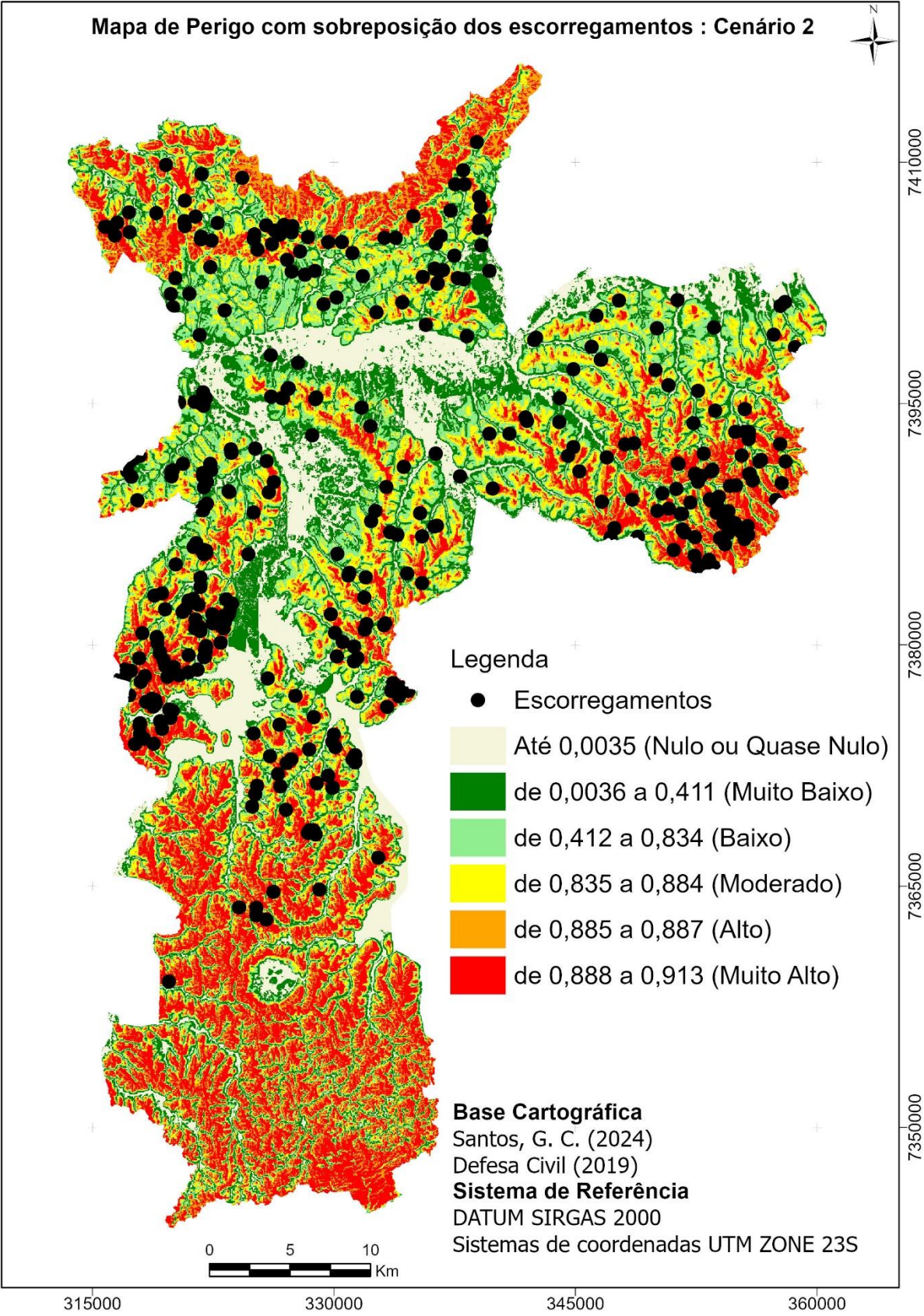
Fonte: O Autor (2022).

5.2.2 Cenário 02

Para a criação do Cenário 2 (Figura 37), foi estabelecido o critério de análise de sensibilidade, esta ação possibilitou a escolha dos parâmetros que exerceram maior influência a escorregamento. Deste modo, adotando a exclusão daqueles que tiveram resultados de análise abaixo de 0,99, cinco parâmetros foram excluídos, sendo eles, a curvatura longitudinal, acumulação de fluxo, índice de umidade topográfica, índice de convergência e fator LS, como demonstrado na Tabela 01.

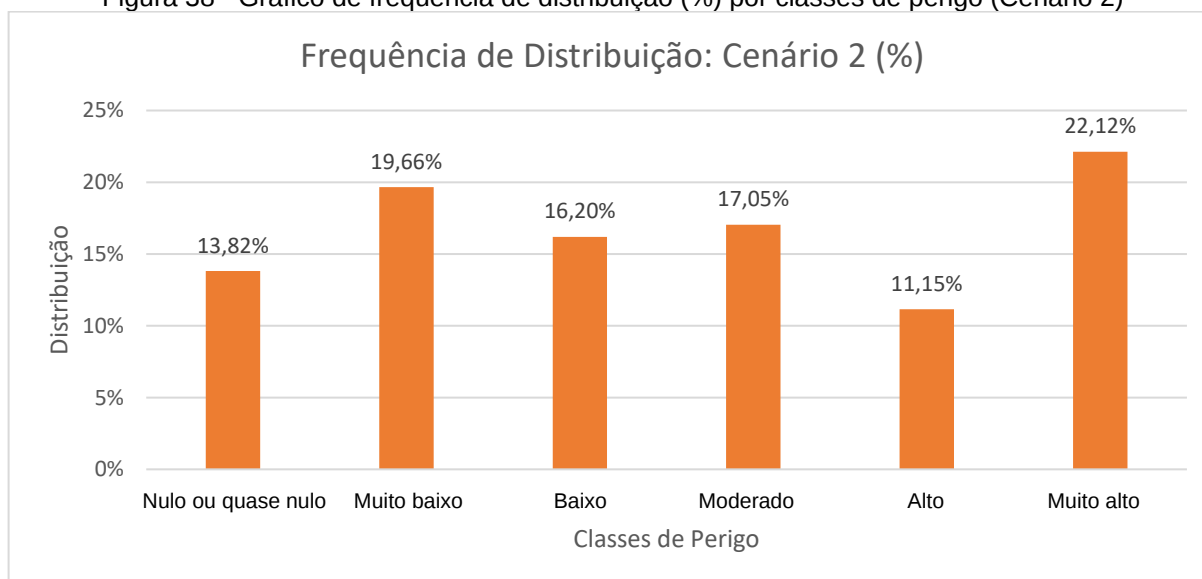
Os resultados de saída da rede neural para o Cenário 2 variaram entre 0,0035 e 0,913. Nesta configuração, o percentual de classes ficou bastante diferenciado do primeiro quantos às áreas de perigo, como evidenciado no gráfico de Frequência de Distribuição (Figura 38).

Figura 37 - Mapa de perigo do **Cenário 2** com pontos de ocorrências de escorregamentos sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 38 - Gráfico de frequência de distribuição (%) por classes de perigo (Cenário 2)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

De acordo com o gráfico, a classe de perigo muito alto continua destacada no Cenário 2, apresentando frequência de distribuição de 22,12% do total. A classe de perigo muito baixo ficou com frequência de distribuição de 19,66%. Já a classe de perigo baixo apresentou frequência de distribuição de 16,20%. Em relação à classe de perigo moderado, esta obteve frequência de distribuição de 17,05%. A classe de perigo alto apresentou frequência de distribuição de 11,15% e para a classe de perigo nulo ou quase nulo, o resultado foi de 13,82%. Neste contexto, percebe-se uma menor generalização na distribuição de classes.

Neste cenário, os locais onde concentram as áreas de perigo muito alto continuam sendo os mesmos apontados no Cenário 1. Entretanto, houve uma maior distribuição e um aumento significativo na porcentagem de ambas as classes. Assim, percebe-se uma maior concentração da classe de perigo baixo e demais classes em áreas de altitudes elevadas. O que aponta um maior aprendizado da RNA durante a fase de treinamento, validação e teste.

As áreas situadas nas extremidades da Zona Norte, no extremo da Zona Leste e parte da Zona Sul, a saber, nas subprefeituras do Jaçanã – Tremembé, Freguesia do Ó – Brasilândia, Pirituba – Jaraguá e Perus, na Zona Norte; Cidade Tiradentes e São Mateus na Zona Leste e parte das subprefeituras de M'Boi Mirim e Campo Limpo nas extremidades da Zona Sul apresentaram índice alto e muito alto. Nas demais

subprefeituras predominaram as demais classes, destacando as classes de perigo moderado e alto.

Os parâmetros que exerceram maior influência durante a modelagem e elaboração do Cenário 2 foram os morfológicos elevação, declividade, aspecto, curvatura da superfície transversal, posição relativa do declive e profundidade do vale, e nível básico da rede de canais, ambos com grau de sensibilidade equivalente a 1, índice de posição topográfica, sombreamento analítico e distância vertical até a rede de canais com 0,99. Apenas o parâmetro morfológico índice de balanço de massa apresentou grau de sensibilidade de 0,97. Percebe-se um aumento significativo dos parâmetros com grau de sensibilidade 1 no cenário 2 em relação ao Cenário 1.

Vale destacar que a rede de drenagem na cidade de São Paulo é extensa. Neste contexto, os parâmetros morfológicos associados à intensa urbanização, exercem um impacto relevante nas redes de drenagens, influenciando no escoamento das águas pluviais, tornando-os mais rápidos, causando enchentes, gerando instabilidades no solo e conseqüentemente, escorregamentos.

Na literatura, Gameiro *et al.* (2021), Gameiro *et al.* (2022) utilizaram 16 parâmetros morfológicos na modelagem de uma rede neural para avaliar os critérios de amostragem na confecção de mapas de suscetibilidade a escorregamentos de terra na região da Serra Geral, Região Sul do Brasil. Neste estudo, os parâmetros que apresentaram maior significância foram a elevação, a declividade, o fator LS e profundidade de vale.

Correlacionando com esta pesquisa, os parâmetros elevação, declividade e profundidade de vale foram fatores relevantes na modelagem de ambos os cenários. De acordo com Quevedo *et al.* (2019), há uma estreita relação entre a declividade e o fator LS por possuírem bases comuns, o que facilita o processo de modelagem. Os autores apontam que, se um destes parâmetros demonstrar maior relevância durante a modelagem, o outro demonstrará efeito contrário, como ocorreu neste presente trabalho, onde a declividade superou o fator LS no grau de sensibilidade, gerando a sua exclusão para a construção do Cenário 2.

Huang *et al.* (2022) avaliaram a suscetibilidade de escorregamentos de terra utilizando uma rede neural artificial para obter um mapa de escorregamentos no condado de Qingchuan, província de Sichuan, China. Os autores utilizaram seis parâmetros, sendo quatro morfológicos (elevação, declividade, aspecto e distância até

a rede de drenagem), além de dois geológicos, enfatizando a importância destes parâmetros na deflagração de escorregamentos de terra, sendo os três primeiros considerados influentes na deflagração de escorregamentos.

Assim como nesta pesquisa, os parâmetros elevação, declividade e aspecto foram fatores importantes na análise de perigo a escorregamentos e modelagem de ambos os cenários. Desta forma, os parâmetros morfológicos citados podem ser considerados como de suma relevância na análise de perigo a escorregamentos.

Observa-se que estes parâmetros são utilizados com frequência na avaliação e análise de suscetibilidade a escorregamentos, sendo considerados como fatores vitais para o mapeamento de suscetibilidade, a exemplo (Lee *et al.* 2003; Pradhan; Lee 2009; Chen *et al.* 2019; Bragagnolo *et al.* 2020; Gameiro *et al.* 2021; Lucchese *et al.* 2021).

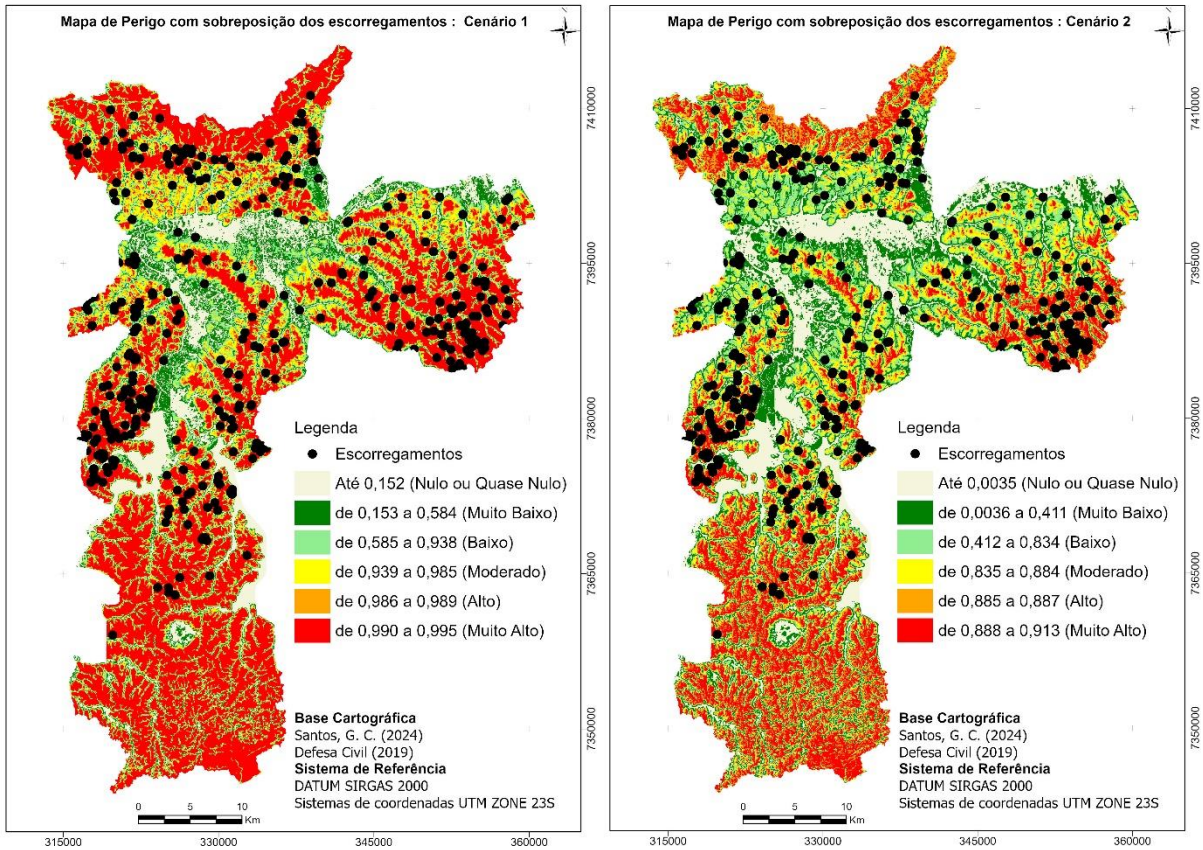
5.3. VALIDAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PERIGO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MÓDULO R. LANDSLIDE

A etapa seguinte envolve a comparação dos dois cenários (Figura 39) e as estimativas geradas pelas estruturas para diferenciar os resultados. A utilização da Curva ROC é uma forma comum para demonstrar a iteração das variações no limite de um sistema classificador binário, com o objetivo de selecionar o cenário mais ideal e o desempenho de saída da RNA para a construção dos dois cenários. Durante a fase de iteração, o cenário que produziu o melhor resultado foi o Cenário 2.

Como já destacado, foram consideradas seis classes de perigo para ambos os cenários, sendo elas (1) nulo ou quase nulo, (2) muito baixo, (3) baixo, (4) moderado, (5) alto e (6) muito alto. Após a reclassificação do arquivo Raster, foi possível verificar, através da Tabela de Atributos, a contagem de pixels referente a cada classe, como demonstrado no gráfico de frequência de distribuição (Figura 40), sendo predominante em ambos os cenários, a classe de perigo muito alto.

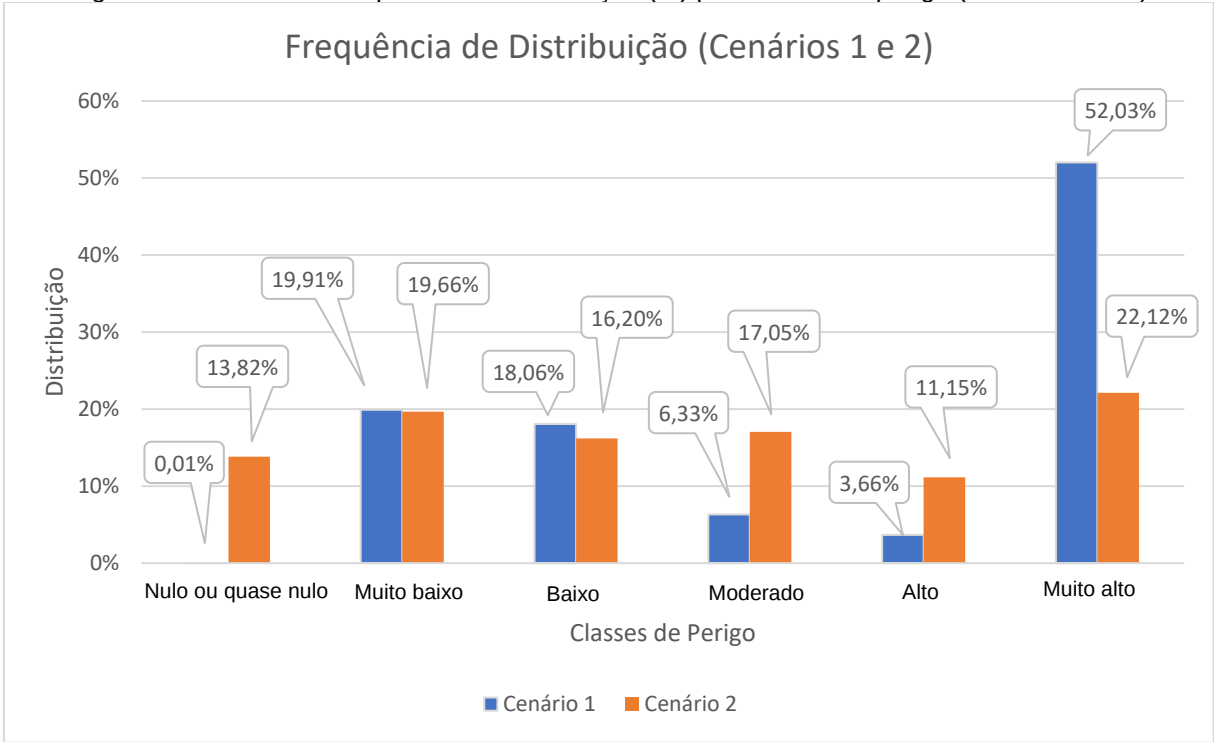
Comparando os resultados das classes de perigo entre os cenários, a classe de perigo muito alto continua destacada no Cenário 2, apresenta frequência de distribuição de 22,12% do total, porém com uma queda considerável em relação aos 52,03% do Cenário 1.

Figura 39 - Correlação entre os Cenários 1 e 2 com os pontos de ocorrências sobrepostos



Fonte: Elaborado pelo Autor (2023).

Figura 40 - Gráfico de frequência de distribuição (%) por classes de perigo (Cenários 1 e 2)



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

A classe de perigo muito baixo ficou com frequência de distribuição de 19,66% ante os 19,91%. A classe de perigo baixo que apresentou frequência de distribuição de 16,20% ante os 18,06% do Cenário 1.

Em relação à classe de perigo moderado, esta aumentou significativamente em relação ao Cenário 1, obtendo frequência de distribuição de 17,05% ante 6,33% do Cenário 1. A classe de perigo alto apresentou frequência de distribuição de 11,15%, diferente do Cenário 1, que apresentou frequência de distribuição de 3,66%. Para o Cenário 1, as classes de perigo nulo ou quase nulo apareceram com valor 0,01%. Estas áreas, caracterizadas como de baixa ou sem nenhuma declividade, tiveram no Cenário 2 o resultado de 13,82%.

Este resultado deixou mais claro as compartimentações de relevo, as encostas e os fundos de vales, deixando estas classes menos generalizadas e mais distribuídas. De acordo com os resultados, a eficiência da rede neural pôde ser demonstrada na qualidade de ambos os mapas, o que comprova que o processo de treinamento, validação e teste, corrobora com um maior aprendizado da RNA.

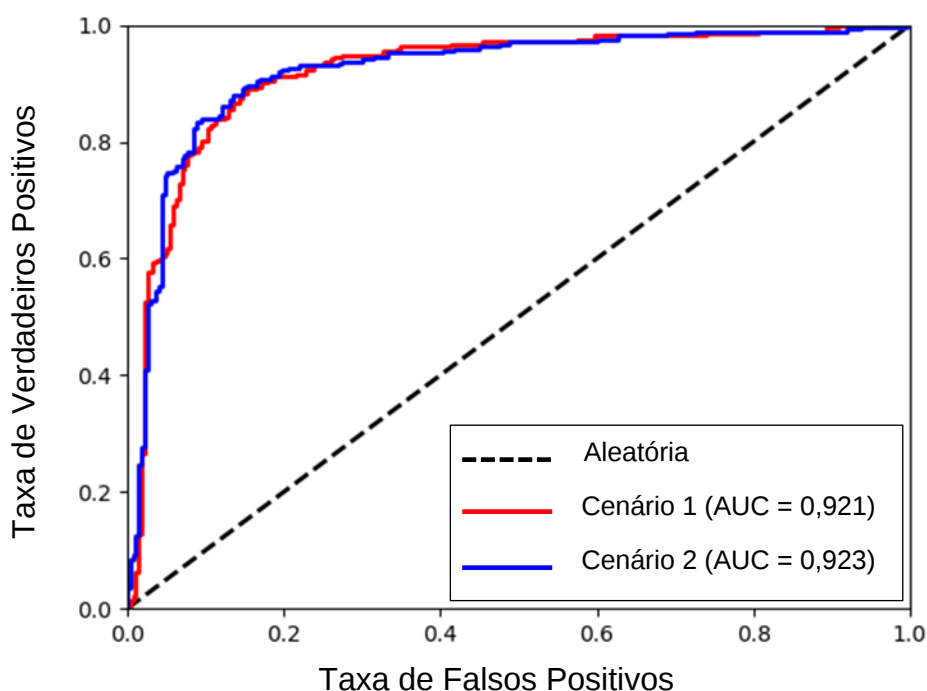
Para simulação e avaliação da RNA, a presente pesquisa utilizou o **módulo *r. landslide***, que é uma rede neural de alto desempenho desenvolvida com a técnica de retropropagação, desenvolvida em linguagem Python para ser aplicada no software GRASS (nesta pesquisa foi utilizada a versão 8.3.2). Os resultados obtidos a partir dessa rede foram posteriormente utilizados nas seções subsequentes para a construção dos cenários de perigo, onde as técnicas de otimização foram baseadas nos resultados da fase inicial de otimização.

Neste cenário, para analisar o desempenho, a acurácia e a precisão dos cenários e do **módulo *r. landslide***, a Curva ROC (Figura 41) foi aplicada para validar os mapas de perigo a escorregamentos gerados. É importante destacar que a curva ROC tem sido bastante empregada na análise dos resultados de saída das redes neurais, como em Yesilnacar e Topal (2005), Yilmaz (2009), Pradhan (2010), Chen *et al.* (2017), Gameiro *et al.* (2021); Bragagnolo *et al.* (2020), entre outros.

Na presente pesquisa, o valor obtido com o emprego dos 16 parâmetros para a construção do Cenário 1 indicou um índice de acurácia de 0,921 e o índice de previsão de 92,1%, apresentando um alto nível de excelência em adequação e precisão. Após a exclusão dos parâmetros resultantes da análise de sensibilidade realizada pela RNA, o valor obtido com o emprego dos 11 parâmetros para a

construção cenário 2, obteve acurácia de 0,923 com o índice de previsão de 92,3%, indicando que o cenário 2 atingiu um maior nível de acurácia e maior excelência em termos de acertos e exatidão.

Figura 41 - Gráfico de Curva ROC (Curva Característica de Operação do Receptor) e taxa de predição. Nesta análise, a AUC para validação dos dados de saída da RNA, superou o limiar de 0,9, sendo, respectivamente, 0,921 (92,1%) e 0,923 (92,3%), indicando excelente precisão para ambos os cenários



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Portanto, ao relacionar os resultados atingidos com outras pesquisas que utilizaram algoritmos diferenciados de RNAs para mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos, os valores de acurácia alcançados na modelagem dos cenários de perigo - que é o objetivo desta pesquisa - estes podem ser classificados como excelentes.

Na literatura, Wang *et al.* (2019) compararam o desempenho de quatro redes neurais convolucionais no mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos de terra no condado de Yanshan, China. O resultado da acurácia atingidos pela curva AUC – ROC para as quatro redes neurais foram 0,799 ou 79,9%, 0,813 ou 81,3%, 0,806 ou 80,6% e 0,807 ou 80,7%, na devida ordem.

Hakim *et al.* (2022) aplicaram diferentes algoritmos de aprendizagem profunda (*Deep Learning*) baseados em redes neurais convolucionais no mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos de terra em Icheon, Coreia do Sul. Os valores de validação AUC – ROC para as três redes neurais foram de 0,876 ou 8,76%, 0,852 ou 8,52% e 0,847 ou 8,47%, respectivamente.

Saha e Saha (2022) integraram diferentes algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina na comparação de mapas de suscetibilidade de escorregamentos de terra produzidos na região de Kurseong, no Himalaia. Os valores de acurácia AUC – ROC para validação dos oito modelos propostos fora de 0,8457 ou 84,57%, 0,9037 ou 90,37%, 0,8376 ou 83,76%, 0,8805 ou 88,05%, 0,8810 ou 88,10%, 0,9228 ou 92,28%, 0,8417 ou 84,17% e 0,8846 ou 88,46%, nessa ordem.

Os autores acima citados utilizaram diversos algoritmos de RNAs em diferentes localidades no mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos. Comparando os resultados de saída da Curva ROC dos trabalhos acima citados com resultados de saída do **módulo r. landslide**, percebemos que o resultado obtido em ambos os cenários supera os valores das pesquisas acima citadas, o que comprova a eficiência da RNA na elaboração de mapeamento de perigo em grandes áreas.

Desta forma, entende-se que a curva ROC, em conjunto com os valores da área sob a curva (AUC), são parâmetros importantes para o desempenho do modelo. A AUC, de maneira geral, indica facilmente a capacidade de previsão do modelo aplicado. Os resultados demonstram que os valores de acurácia para a modelagem de treinamento, validação e teste, apontaram que o **módulo r. landslide** obteve um desempenho excelente para ambos os cenários. Isso implica que a totalidade de resultados positivos do módulo forneceram retornos ótimos para este estudo. Neste contexto, a rede neural artificial **módulo r. landslide** comprova a sua robustez e eficiência na análise de escorregamentos em grandes áreas, como a cidade de São Paulo. Isso indica sua capacidade de aprender a relação complexa entre os escorregamentos e seus fatores condicionantes a partir da inserção de dados consistentes, como os utilizados nesta pesquisa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa propôs uma metodologia para elaboração de dois cenários de perigo a escorregamentos utilizando redes neurais artificiais na cidade de São Paulo.

A utilização de redes neurais artificiais na previsão de suscetibilidade e risco a escorregamentos, vem crescendo vertiginosamente em vários países do mundo, porém ainda inserida de modo tímido no Brasil. Quanto à avaliação de perigo, o presente trabalho, utilizando essa metodologia, é, talvez, um dos primeiros a contribuir para tais estudos.

Na presente pesquisa foram utilizados 16 parâmetros condicionantes relacionados a escorregamentos, extraídos do MDT *Copernicus* e dados de escorregamentos cedidos pela Defesa Civil da cidade de São Paulo. O inventário de escorregamentos consistiu em um total de 433 pontos de escorregamentos. Como dito anteriormente, estes pontos foram extraídos a partir das tabelas EXCEL contendo os dados históricos de escorregamentos ocorridos na cidade de São Paulo, sendo escolhido os dados referentes ao ano de 2019.

Posteriormente foram selecionados aleatoriamente 273 pontos de escorregamentos desta tabela e, na proporção 1:1, foram criados a mesma quantidade de pontos de não escorregamentos para treinar, validar e testar o desempenho da rede neural. Os índices de precisão foram avaliados utilizando a Curva ROC. Os valores de acurácia obtidos foram 0,921 ou 92,1% e 0,923 ou 92,3% para os Cenários 1 e 2, nesta ordem.

Destaca-se que os parâmetros utilizados nesta pesquisa contribuem significativamente na deflagração de escorregamentos, sendo sua análise em rede neural artificial muito significativa, haja vista, em sua maioria, serem de difícil medição em campo. Nessa perspectiva, a identificação de áreas predispostas a escorregamentos e sua localização, em consonância com as determinadas classes de perigo, exercem um papel importante no planejamento urbano.

Neste contexto, os resultados evidenciam que os cenários de perigo a escorregamentos obtidos utilizando a rede neural artificial **módulo r. landslide** possuem níveis consideráveis de acurácia, confirmando que a ocorrência de classes de perigo muito alto são as que predominam na cidade de São Paulo, o que é muito preocupante devido à alta urbanização nestas áreas.

Assim sendo, a identificação de áreas predispostas a escorregamentos e sua localização, em consonância com as determinadas classes de perigo, exercem um papel importante no planejamento urbano.

É importante destacar que os mapas de perigo devem passar por uma avaliação periódica, dada a dinâmica de uso e ocupação da terra, principalmente em cidades com altitudes e declividades elevadas, como a cidade de São Paulo, onde uma área de perigo antes desabitada, possa vir a ser ocupada futuramente. Este feito é muito recorrente e as ocupações em áreas impróprias à ocupação humana continuam ocorrendo com celeridade na cidade de São Paulo.

No decorrer do processo de modelagem, surgiram algumas dificuldades, como o alto custo dos softwares comumente utilizados, a exemplo o MATLAB. Para tanto, foi necessária uma busca na rede com o intuito de encontrar uma rede neural de código aberto, cuja execução requeresse o uso de software livre e que executasse a função predisposta nos objetivos desta pesquisa. Outro fator importante é a execução do software GRASS e a chamada da rede neural através deste software. Durante a execução, a rede neural apresentou erros constantes no decorrer do processamento, o que foi resolvido com a correta configuração da região computacional do software.

É preciso acentuar que a qualidade e disponibilidade de banco de dados de escorregamentos podem gerar inconsistências ou até mesmo limitar consideravelmente o resultado da pesquisa. Em razão da qualidade, além do erro referente ao software reportado acima, no banco de dados de escorregamentos utilizado nesta modelagem constavam diversos endereços com coordenadas duplicadas, o que gerava pontos sobrepostos que implicava em erro de execução da rede neural, este problema foi resolvido depois de uma minuciosa busca na tabela e na eliminação destes pontos. Em relação à disponibilidade, devemos considerar que não são todas as cidades onde a administração pública se mobiliza para montar um banco de dados consistente de eventos geodinâmicos, o que pode restringir ou até mesmo inviabilizar futuras pesquisas.

No tocante às bases cartográficas, por se tratar de uma grande área, algumas bases foram generalizadas pelos órgãos competentes que as criaram. Por esta razão, como já reportado anteriormente, as bases de geologia, geomorfologia e solos não foram utilizadas como parâmetros devido à escala em que foram criadas, sendo

1:250.000 para ambas. A base cartográfica de solos ainda foi agravada pela generalização da área urbana, o que deu a entender que nesta área há apenas um tipo de solo, o que não pode ser caracterizado como verdade, haja vista a grande extensão da área. Os parâmetros uso e ocupação da terra e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ou índice de vegetação de diferença normalizada também se tornaram inúteis. A primeira pela dificuldade de interpretação via imagens de satélites, Google Earth Pro ou ortofotos. Sendo uma cidade com intensa urbanização, a interpretação de cicatrizes de escorregamentos via imagens se tornou impossível. Quanto ao NDVI, se ele é utilizado para medir a densidade da vegetação, ele se tornou inviável devido à intensa urbanização e a falta considerável de áreas verdes no perímetro urbano da cidade de São Paulo.

Conforme pôde-se constatar, mesmo com as dificuldades associadas à execução deste trabalho, salienta-se que os objetivos propostos foram alcançados, comprovando a eficácia e robustez do **módulo r. landslide** na detecção de setores de perigo a escorregamentos em grandes áreas.

Em última análise, é importante frisar que as áreas de perigo ocorrem em toda a extensão da cidade de São Paulo, inclusive em áreas próximas à região central. No entanto, devido à dinâmica destas localidades, o perigo se torna invisível devido à atuação do poder público nestes locais, assim como ao alto padrão de construções e ao poder aquisitivo dos moradores destas localidades. São áreas de relevo acentuado, igualmente aos existentes nas áreas periféricas, mas com saneamento básico, infraestrutura urbanas, ruas asfaltadas, e, apesar dos cortes nos relevos para a construção de moradias, há a construção de complexas estruturas de engenharia, como as fundações e muros de arrimos nestas edificações.

Ao contrário, as regiões mais afastadas, onde a precarização das construções, a alta declividade, a falta de saneamento básico, de infraestrutura, de asfaltamento e da ausência do poder público nestas localidades, acarreta o uso indevido do solo, sem condições mínimas necessárias para uma sobrevivência digna. São nestes locais que acontecem os escorregamentos de maior gravidade, que geram perda de materiais e de vidas.

Neste cenário, os mapas de perigo a escorregamentos de terra gerados na área de estudo, podem ser empregados pelos órgãos gestores e até mesmo pela

população no reconhecimento de áreas de perigo e consequentemente na redução das perdas causadas por eventos geodinâmicos.

Nesta perspectiva, em termos de trabalho futuro, é importante considerar a exploração do potencial de outros algoritmos de aprendizado de máquina, como Floresta Aleatória, Redes Neurais Convolucionais, Máquina de Vetores, Regressão Logística, entre outros na modelagem de cenários de perigo a escorregamentos.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Geomorfologia do sítio urbano de São Paulo**. Ateliê editorial, 1957.
- AB'SÁBER, Aziz Nacib. Geografia e planejamento. **Revista de História**, São Paulo, v. 39, n. 80, p. 257-272, 1969.
- AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil – potencialidades paisagísticas**. 7ª ed. – Cotia – SP: Ateliê Editorial, 2012, 158p.
- ALCÁNTARA-AYALA, Irasema. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, n. 2-4, p. 107-124, 2002.
- ALDANO, Mariana. **Bairro da Zona Leste de SP tem 2 deslizamentos de terra em 15 dias; moradores se dizem abandonados**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/03/01/bairro-da-zona-leste-de-sp-tem-2-deslizamentos-de-terra-em-15-dias-moradores-se-dizem-abandonados.ghtml>. Acesso em: 2 fev. 2022.
- ALEOTTI, Pietro; CHOWDHURY, Robin. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the environment**, v. 58, p. 21-44, 1999.
- ALVES, Rogério Rozolen; GALVANI, Emerson. Ocorrência horária e sazonal das precipitações no município de São Paulo, SP. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 9, p. 530–540-530–540, 2012.
- AMARAL JUNIOR, Alberto Ferreira do. **Mapeamento geotécnico aplicado a análise de processos de movimentos de massa gravitacionais: Costa Verde-RJ-escala 1: 10.000**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas-COBRAE. Anais**. 1992. p. 721-733.
- AZEVEDO, Caio da Silva. **Uso de redes neurais artificiais na elaboração de mapas de suscetibilidade para escorregamentos planares rasos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.
- AZEVEDO, Guilherme; RAMALHOSO, Wellington. **Deslizamentos de terra mataram 202 pessoas nos últimos 20 anos na Grande SP**. 2017. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2017/01/31/deslizamentos-de-terra-mataram-202-pessoas-nos-ultimos-20-anos-na-grande-sp.htm#:~:text=Deslizamentos%20de%20terra%20mataram%20202%20pessoas%20nos%20%C3%BAltimos%2020%20anos%20na%20Grande%20SP,-Deslizamentos%20como%20este&text=Duzentas%20e%20duas%20pessoas%20morreram,de%20dez%20casos%20por%20ano>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- BASHEER, Imad A.; HAJMEER, Maha. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. **Journal of microbiological methods**, v. 43, n. 1, p. 3-31, 2000.

BENDER, Andréia. **Eventos de tempo severo associados às linhas de instabilidade sobre o estado de São Paulo**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BETEGA, Daniel. **Defesa Civil de Santo André interdita 191 imóveis em áreas de risco**. Disponível em: <https://abcdoabc.com.br/defesa-civil-de-santo-andre-interdita-191-imoveis-em-areas-de-risco/>. Acesso em 2022.

BHARDWAJ, Alok; VENKATACHALAM, G. Landslide hazard evaluation using artificial neural networks and GIS. In: **Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Volume 2: Methods of Landslide Studies**. Springer International Publishing, 2014. p. 397-403.

BI, Renneng et al. Landslide susceptibility analysis based on ArcGIS and Artificial Neural Network for a large catchment in Three Gorges region, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, p. 1925-1938, 2014.

BONUCCELLI, Teresinha de Jesus; ZUQUETTE, Lázaro Valentim. Estudo dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG): escala 1: 10.000. 1999.

BOUERI, Rogério et al. **Brasil em desenvolvimento 2013: estado, planejamento e políticas públicas**. 2013.

BRAGAGNOLO, Lucimara.; DA SILVA, Roberto Valmir; GRZYBOWSKI, José Mario Vicensi. Landslide susceptibility mapping with r. landslide: A free open-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks. **Environmental Modelling & Software**, v. 123, p. 104565, 2020.

BRAGAGNOLO, Lucimara.; SILVA, R. V. D.; GRZYBOWSKI, J. M. V. Artificial neural network ensembles applied to the mapping of landslide susceptibility. **Catena**, v. 184, n. September 2019, p. 104240, 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES; IPT-INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades/Cities Alliance. **Prevenção de Riscos de Escorregamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais** / Celso Santos Carvalho e Thiago Galvão, organizadores –Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006, 111p.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios** / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores –Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas–IPT, 2007. 176 p.

BRASIL. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. **Guia para o Mapeamento e Caracterização de Assentamentos Precários**. Brasília: MCidades, 2010.

BRASIL. SGB-Serviço Geológico. Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa–Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais–Projeto GIDES. (livro eletrônico): CPRM–Coordenação: Jorge Pimentel e Thiago Dutra dos Santos. **Rio de Janeiro: CPRM/SGB–Serviço Geológico do Brasil**, 2018.

BROLLO, Maria José; FERREIRA, Cláudio José F. **GESTÃO DE RISCOS DE DESASTRES DEVIDO A FENÔMENOS GEODINÂMICOS NO ESTADO DE SÃO PAULO: CENÁRIO 2000-2015.** 2016. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2016/10/boletim_IG_vol_67.pdf. Acesso em: 1 fev. 2022.

BURTON, Ian; KATES, Robert W. e WHITE, Gilbert F. **The environmental as hazard.** New York: Oxford University, 1978. 240p.

CARDOSO, William. **Capital paulista tem 481 áreas com risco de escorregamentos.** São Paulo. 3 de jan. de 2021 Disponível em: <https://agora.folha.uol.com.br/sao-paulo/2021/01/capital-paulista-tem-481-areas-com-risco-de-deslizamentos.shtml#> Acesso em: 02 de fev. de 2022.

CARVALHO, Leila MV; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377-2394, 2002.

CARVALHO, Leila MV; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004.

CARVALHO, Celso Santos; GALVÃO, Thiago. Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: Guia para elaboração de políticas municipais. Brasília: Ministério das Cidades. **Cities Alliance**, 2006.

CHEN, Wei et al. Applying population-based evolutionary algorithms and a neuro-fuzzy system for modeling landslide susceptibility. **Catena**, v. 172, p. 212-231, 2019.

CHEN, Wei et al. Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques. **Geoderma**, v. 305, p. 314-327, 2017.

CHIEREGATI, Luiz Antônio et al. **Projeto Integração Geológica da Região Metropolitana de São Paulo. Relatório de Integração Geológica.** CPRM, 1991.

CHOI, Jaewon et al. Validation of an artificial neural network model for landslide susceptibility mapping. **Environmental Earth Sciences**, v. 60, p. 473-483, 2010.

CHURCHLAND, Patricia Smith; SEJNOWSKI, Terrence Joseph. **The computational brain.** MIT press, 1992.

COIMBRA, Armando Márcio; RICCOMINI, Claudio; MELO, Mário Sérgio de. A Formação Itaquaquetuba: evidências de tectonismo no quaternário paulista. **Atas do 4º Simpósio Regional de Geologia**, p. 253-266, 1983.

COROMINAS, Jordi. El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. **Cuaternario y geomorfología**, v. 20, n. 3-4, p. 89-113, 2006.

COROMINAS, Jordi; LEROI, Eric; SAVAGE, William Z. Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. **Engineering geology**, v. 102, n. 3-4, 2008.

CORRÊA, Roberto Lobato. **O Espaço Urbano**, São Paulo: Editora Ática, 1989. 49p.

CORTELETTI, Rosyelle Cristina. **Metodologia para análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias: Estrada de Ferro Carajás (EFC)**. Ouro Preto: Editora UFOP, 2017. 222 p.

CRUDEN, David Milne. **The multilingual landslide glossary**. The International Geotechnical Societies UNESCO Working Party for World Landslide Inventory, Richmond: Bitech, v.5, 1993.

CRUDEN, David; LAN, Heng-Xing. Using the working classification of landslides to assess the danger from a natural slope. In: **Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes**. Springer International Publishing, 2015. p. 3-12.

CRUDEN, David; VARNES, David Joseph (1996). Landslide Types and Processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), **Landslides: investigation and mitigation**. National Academy Press, Washington, D.C. 247. 36–75.

CYBENKO, George. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. **Mathematics of control, signals and systems**, v. 2, n. 4, p. 303-314, 1989.

DANG, Viet-Hung et al. Enhancing the accuracy of rainfall-induced landslide prediction along mountain roads with a GIS-based random forest classifier. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 78, p. 2835-2849, 2019.

DE ALMEIDA, Fernando Flávio Marques; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Origem e evolução da Serra do Mar. **Brazilian Journal of Geology**, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.

DE ALMEIDA, Fernando Flávio Marques. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Revista do Instituto Geológico, São Paulo**, v. 39, n. 3, p. 9-75, 1964.

DE FREITAS, Ruy Ozorio. Sobre a origem da Bacia de São Paulo. **Boletim Paulista de Geografia**, n. 9, p. 60-64, 1951.

DE OLIVEIRA, Guilherme Garcia et al. Random forest and artificial neural networks in landslide susceptibility modeling: a case study of the Fão River Basin, Southern Brazil. **Natural Hazards**, v. 99, n. 2, p. 1049-1073, 2019.

DE PLOEY, Jan.; CRUZ, Olga. Landslides in the serra do mar, Brazil. **Catena**, v. 6, n. 2, p. 111-122, 1979.

DENG, Hui et al. Slope-unit scale landslide susceptibility mapping based on the random forest model in deep valley areas. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, p. 4245, 2022.

DIAS, Fernando Peres; HERRMANN, ML de P. Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis–SC. **Caminhos de Geografia**, v. 3, n. 6, p. 57-73, 2002.

DING, Qingfeng; CHEN, Wei; HONG, Haoyuan. Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping. **Geocarto international**, v. 32, n. 6, p. 619-639, 2017.

DONATO, Veruska. **Deslizamentos de terra fazem Defesa Civil interditar 40 casas em Mauá**. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao->

paulo/noticia/2019/02/27/deslizamentos-de-terra-fazem-defesa-civil-interditar-40-casas-em-maua.shtml. Acesso em 2022.

DOS SANTOS, Humberto Gonçalves et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018.

ERCANOGLU, Murat; GOKCEOGLU, Candan. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. **Environmental geology**, v. 41, p. 720-730, 2002.

ERCANOGLU, MURAT; GOKCEOGLU, CANDAN; VAN ASCH, Th WJ. Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. **Natural Hazards**, v. 32, p. 1-23, 2004.

ERMINI, Leonardo; CATANI, Filippo; CASAGLI, Nicola. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. **geomorphology**, v. 66, n. 1-4, p. 327-343, 2005.

FARIA, Daniela Girio Marchiori. **Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP)**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FERNANDES, Nelson Ferreira; AMARAL, CP do. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. **Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro**, p. 123-194, 1996.

FERNANDES, Nelson Ferreira et al. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, 2001.

FREIRE, 1965. **Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática**. Construção, Rio de Janeiro, n. 8, p. 10-18.

G1 SP. **Deslizamento de terra atinge ônibus na Zona Norte de SP**. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2020/02/10/deslizamento-de-terra-atinge-onibus-na-zona-norte-de-sp.shtml>. Acesso em 2022.

GAMEIRO, Samuel et al. Análise e correlação de atributos morfométricos e sua influência nos movimentos de massa ocorridos na Bacia do Rio Rolante, RS. **Anais SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIX**, 2019.

GAMEIRO, Samuel. **Capacidade de Generalização e Extrapolação de Redes Neurais Artificiais no Mapeamento a Suscetibilidade de Deslizamentos**. 2020. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR- RS, 2020.

GAMEIRO, Samuel et al. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility: The effect of sampling areas on model capacity for generalization and extrapolation. **Applied Geography**, v. 137, p. 102598, 2021.

GAMEIRO, Samuel; DE OLIVEIRA, Guilherme Garcia; GUASSELLI, Laurindo Antônio. The influence of sampling on landslide susceptibility mapping using artificial neural networks. **Geocarto International**, p. 1-23, 2022.

GAO, Jay. Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, USA. **Earth surface processes and landforms**, v. 18, n. 7, p. 579-591, 1993.

GHASEMIAN, Bahareh et al. A robust deep-learning model for landslide susceptibility mapping: A case study of Kurdistan Province, Iran. **Sensors**, v. 22, n. 4, p. 1573, 2022.

GUILLARD, Clemence; ZEZE, Jose. Landslide susceptibility assessment and validation in the framework of municipal planning in Portugal: the case of Loures Municipality. **Environmental management**, v. 50, p. 721-735, 2012.

GERMAN, Gordon. W. H.; GAHEGAN, Mark. Neural network architectures for the classification of temporal image sequences. **Computers Geosciences**, v. 22, n.9, p. 969 – 979, 1996.

PMSP, Gestão Urbana SP. Disponível em:

<<https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/marco-regulatorio/zoneamento/arquivos/>>. 2016. Acesso em: 04 abr. 2023.

GOMEZ, Hector; KAVZOGLU, Taskin. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. **Engineering Geology**, v. 78, n. 1-2, p. 11-27, 2005.

GORSEVSKI, Pece V. et al. Landslide detection and susceptibility mapping using LiDAR and an artificial neural network approach: a case study in the Cuyahoga Valley National Park, Ohio. **Landslides**, v. 13, p. 467-484, 2015.

GOUVEIA, Isabel Cristina Moroz Caccia. **Da originalidade do sítio urbano de São Paulo às formas antrópicas: aplicação da abordagem da geomorfologia antropogênica na bacia hidrográfica do Rio Tamanduateí, na região metropolitana de São Paulo**. 2010. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/T.8.2010.tde-31012011-123012. Acesso em: 2024-05-09.

GROSTEIN, Marta Dora. Metrôpole e expansão urbana: a persistência de processos" insustentáveis". **São Paulo em perspectiva**, v. 15, p. 13-19, 2001.

GUERRA, Antônio José Teixeira; DA CUNHA, Sandra Baptista. Geomorfologia e meio ambiente. 1996.

GUERRA, Antônio Teixeira; GUERRA, A. J. T. Dicionário Geológico-Geomorfológico. 9ª edição. **Rio de Janeiro: Bertrand Brasil**, 2011.

GURGUEIRA, Magali Dubas. **Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GUZZETTI, Fausto et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, n. 1-4, p. 181-216, 1999.

GUZZETTI, Fausto et al. Comparing Landslide Maps: A Case Study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. **Environmental management**, v. 25, n. 3, 2000.

GUZZETTI, Fausto et al. Power-law correlations of landslide areas in central Italy. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 195, n. 3-4, p. 169-183, 2002.

HAKIM, Wahyu Luqmanul et al. Convolutional neural network (CNN) with metaheuristic optimization algorithms for landslide susceptibility mapping in Icheon, South Korea. **Journal of environmental management**, v. 305, p. 114367, 2022.

HASUI, Yociteru; PENALVA, Faustino.; HENNIES, Wildor Theodoro. Geologia do Grupo São Roque. In: **Congresso Brasileiro de geologia**. 1969. p. 101-134.

HASUI, Yociteru; HAMA, Morio. (1972) Geocronologia do Grupo São Roque pelo método K-Ar. **Revista Brasileira de Geociências**, SBG, São Paulo. 2: 18-24.

HASUI, Yociteru. **Tectônica da área das folhas de São Roque e Pilar do Sul**. 1973. Tese (Livre Docência em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

HASUI, Yociteru et al. The Ribeira folded belt. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, n. 4, p. 257-266, 1975.

HASUI, Yociteru; SADOWSKI, Georg Robert. Evolução geológica do Precambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 6, p. 182-200, 1976.

HASUI, Yociteru. et al. O embasamento pré-cambriano e o paleozóico em São Paulo. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala**, v. 1, n. 500.000, p. 12-45, 1981.

HAYKIN, Simon. **Redes neurais: princípios e prática**. Bookman Editora, 2001.

HEBB, Donald. **The organization of behavior**. EmphNew york. 1949.

HEWITSON, Bruce C.; CRANE, Robert G. (Ed.). **Neural nets: applications in geography: applications for geography**. Springer Science & Business Media, 1994.

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. **The landslide handbook-A guide to understanding landslides**. US Geological Survey, 2008.

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. O manual de deslizamento—Um guia para a compreensão de deslizamentos. **Reston, Virginia, US Geological Survey Circular**, v. 1325, 2008.

HOPFIELD, John J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 79, n. 8, p. 2554-2558, 1982.

HUANG, Jianling et al. Landslide susceptibility evaluation using different slope units based on BP neural network. **Computational intelligence and neuroscience**, v. 2022, 2022.

HUNGR, Oldrich; LEROUÉIL, Serge; PICARELLI, Luciano. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, p. 167-194, 2014.

HUTCHINSON, John Neville. General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES**, 5., 1988, Rotterdam. Proceedings Rotterdam: Bonnard C, 1988. p.3-35.

INFANTI JR, Nelson; FORNASARI FILHO, Nilton. Processos de dinâmica superficial. **Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE**, p. 131-152, 1998.

INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. **Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives**. 2004.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, (Orgs.). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

JAISWAL, Pankaj; VAN WESTEN, Cees J. Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. **Geomorphology**, v. 112, n. 1-2, p. 96-105, 2009.

JULIANI, Caetano. **O embasamento pré-cambriano da bacia de São Paulo**. 1992, Anais. São Paulo: ABAS/ABGE/SBG, 1992. p. 3-20.

JULIANI, Caetano. Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos Grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP. 1993.

KASABOV, Nikola K. **Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering**. Marcel Alencar, 1996.

KAWABATA, Daisaku; BANDIBAS, Joel. Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN). **Geomorphology**, v. 113, n. 1-2, p. 97-109, 2009.

KODAMA, Yasumasa. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 70, n. 4, p. 813-836, 1992.

KRIESEL, David. **A Brief introduction to neural networks**. University of Bonn in Germany, 2005.

LEE, Saro. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. **International Journal of remote sensing**, v. 26, n. 7, p. 1477-1491, 2005.

LEE, Saro et al. Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea. **Environmental Geology**, v. 44, p. 820-833, 2003.

LIEBMANN, Brant; JONES, Charles; DE CARVALHO, Leila MV. Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of Sao Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, v. 14, n. 2, p. 208-218, 2001.

LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito. **Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LOPES, Eymar Silva Sampaio. **Modelagem espacial dinâmica aplicada ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista, na escala de 1: 10.000**. 2006.

LUCCHESE, Luísa Vieira; DE OLIVEIRA, Guilherme Garcia; PEDROLLO, Olavo Correa. Attribute selection using correlations and principal components for artificial neural networks employment for landslide susceptibility assessment. **Environmental monitoring and assessment**, v. 192, n. 2, p. 129, 2020.

MARENGO, Jose Antônio. et al. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004.

MARENGO, Jose Antônio et al. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, n. 1, p. 5-20, 2020.

MARRA, Lívia. Chuva provoca deslizamentos de terra e alagamentos em SP. 2003. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u67691.shtml>. Acesso em 2022.

MATTEDI, Marcos Antônio; BUTZKE, Ivani Cristina. The relation between the social and the natural in the approach of hazards and disasters. **Ambiente & Sociedade**, p. 93-114, 2001.

MCCLELLAND, James L. et al. **Parallel distributed processing, volume 2: Explorations in the microstructure of cognition: Psychological and biological models**. MIT press, 1986.

MCCULLOCH, Warren S.; PITTS, Walter. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The bulletin of mathematical biophysics**, v. 5, p. 115-133, 1943.

MELO, Mário Sérgio de; CAETANO, S. L. V.; COIMBRA, Armando Márcio. Tectônica e sedimentação na área das bacias de São Paulo e Taubaté. **Resumos e Breves Comunicacoes. Boletim 1**, 1986.

MELO, Mário Sérgio de et al. Datações C14 em sedimentos quaternários da Grande São Paulo. In: **Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, ABEQUA**. 1987. p. 427-436.

MENA, Fernanda; IAVELBERG, Carlos. **Deslizamentos matam 9 em São Bernardo**. 2005. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff1301200501.htm#:~:text=Na%20madrugada%20de%20ontem%2C%20%C3%A0s,crian%C3%A7as%20e%20um%20adulto%20morreram>. Acesso em 2022.

MENGUE, Priscila. **Chuvas causam ao menos 31 mortes, deslizamentos e alagamentos na Grande SP e interior**. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/sao-paulo/franco-da-rocha-sp-enfrenta-deslizamentos-e-transbordamento-de-rios-apos-chuvas/>. Acesso em 2022.

METEN, Matebie; PRAKASHBHANDARY, Netra; YATABE, Ryuichi. Effect of landslide factor combinations on the prediction accuracy of landslide susceptibility maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia. **Geoenvironmental Disasters**, v. 2, p. 1-17, 2015.

MEYER, Regina M. Prosperi; GALVÃO, Roberta Fontan Pereira; LONGO, Marlon Rubio. São Paulo e suas escalas de urbanização: cidade, metrópole e macrometrópole. **Revista Iberoamericana de Urbanismo**, n. 12, p. 7-31, 2015.

MIZUTORI, Mami., & GUHA-SAPIR, Debarati. (2017). **Economic losses, poverty and disasters 1998–2017** (Vol. 4, pp. 9–15). United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

MOORE, I. D.; O'LOUGHLIN, E. M.; BURCH, G. J. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 13, n. 4, p. 305-320, 1988.

MÜLLER, Humberto do Lago. “**A cada hora, um novo deslizamento**”, **correspondente da Mural narra a situação em Mairiporã**. Disponível em: <https://agenciamural.org.br/a-cada-hora-um-novo-deslizamento-correspondente-do-mural-narra-a-situacao-em-mairipora/>. Acesso em 2022.

NEFESLIOGLU, Hakan A.; GOKCEOGLU, Candan; SONMEZ, Hakan. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. **Engineering Geology**, v. 97, n. 3-4, p. 171-191, 2008.

NETELER, Markus et al. GRASS GIS: A multi-purpose open-source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 124-130, 2012.

NETELER, Markus; MITASOVA, Helena. **Open-source GIS: a GRASS GIS approach**. Springer Science & Business Media, 2008.

NETO, Dias et al. Evolução tectono-termal do complexo costeiro (faixa de dobramentos Ribeira) em São Paulo. **Anais**, p. 302, 2002.

NETTO, Ana Luiza Coelho et al. January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. **Landslide Science and Practice: Volume 6: Risk Assessment, Management and Mitigation**, p. 377-384, 2013.

NEAUPANE, Krishna M.; ACHET, Shiva H. Use of backpropagation neural network for landslide monitoring: a case study in the higher Himalaya. **Engineering geology**, v. 74, n. 3-4, p. 213-226, 2004.

NIEBLE, Carlos Manoel; GUIDICINI, Guido. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. **Editores Edgard Blücher. 2ª. Ed. São Paulo**, 1984.

NOBRE, Carlos A; YOUNG, Andrea Ferraz. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. **Embaixada Reino Unido, Rede Clima e Programa FAPESP em Mudanças Climáticas**, 2010.

NOLA, Iraydes Tálita de Sena. **Avaliação de dados geológico-geotécnicos prévios para elaboração de carta de eventos perigosos de movimentos de massa gravitacionais por meio de redes neurais artificiais e probabilidade**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NOURANI, Vahid et al. Landslide susceptibility mapping at Zonouz Plain, Iran using genetic programming and comparison with frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. **Natural hazards**, v. 71, p. 523-547, 2014.

NOVAIS, Giuliano. **Climas do Brasil: classificação climática e aplicações**. 1. ed. - Porto Alegre, RS: Totalbooks, 2023.

OZDEMIR, Adnan. A comparative study of the frequency ratio, analytical hierarchy process, artificial neural networks and fuzzy logic methods for landslide susceptibility

mapping: Taşkent (Konya), Turkey. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, p. 4129-4157, 2020.

PANAGOS, Panos, BORRELLI, Pasquale, MEUSBURGER, Katrin, 2015c. A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water. **Geosciences** 5, 117–126.

PAOLA, Justin D.; SCHOWENGERDT, Robert A. A review and analysis of backpropagation neural networks for classification of remotely-sensed multi-spectral imagery. **International Journal of remote sensing**, v. 16, n. 16, p. 3033-3058, 1995.

PARDESHI, Sudhakar D.; AUTADE, Sumant E.; PARDESHI, Suchitra S. Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. **SpringerPlus**, v. 2, p. 1-11, 2013.

PARK, Soyoung et al. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea. **Environmental earth sciences**, v. 68, p. 1443-1464, 2013.

PIMENTEL, Jorge et al. **Manual de mapeamento de perigo e risco a movimentos gravitacionais de massa**. 2018.

PINOTTI, Alexandre Mathias; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Geologia Estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. **Terrae didactica**, v. 9, n. 2, p. 132-168, 2013.

PINTO, Roberto Carlos; PASSOS, Everton; CANEPARO, Sony Cortese. Considerações a respeito dos condicionantes utilizados em pesquisas envolvendo movimentos de massa. **Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM)**, v. 5, n. 1, p. 102-124, 2013.

PRADHAN, Biswajeet. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. **Advances in space research**, v. 45, n. 10, p. 1244-1256, 2010.

PRADHAN, Biswajeet; LEE, Saro. Landslide risk analysis using artificial neural network model focusing on different training sites. **Int J Phys Sci**, v. 3, n. 11, p. 1-15, 2009.

PRADHAN, Biswajeet., LEE, Saro. Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia. **Landslides** 7, 13–30, 2009.

POLYKRETIS, Christos; CHALKIAS, Christos. Comparison and evaluation of landslide susceptibility maps obtained from weight of evidence, logistic regression, and artificial neural network models. **Natural hazards**, v. 93, p. 249-274, 2018.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo Lei nº 16.050, de 31 de julho de 2014 estratégias ilustradas**. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano: 2015

QUEVEDO, Renata Pacheco et al. Modelagem de áreas suscetíveis a movimentos de massa: avaliação comparativa de técnicas de amostragem, aprendizado de máquina e modelos digitais de elevação. **Geosciences**, v. 38, n. 3, p. 781-795, 2019.

LOCAL, Reportagem. Deslizamentos matam 2 e ferem 14 em SP. 1998. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff16029801.htm>. Acesso em 2022.

RICCOMINI, Claudio; COIMBRA, Armando Márcio. Geologia da bacia sedimentar. **Solos da cidade de São Paulo**, 1992.

RICCOMINI, Claudio. **O rift continental do sudeste do Brasil**. 1989. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RICCOMINI, Claudio; SANT'ANNA, Lucy Gomes; FERRARI, André Luiz. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. **Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, CDR**, p. 383-405, 2004.

RODRIGUEZ, Sergio Kleinfelder. **Geologia urbana da região metropolitana de São Paulo**. 1998. Tese de Doutorado.

ROSENBLATT, Frank. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological review**, v. 65, n. 6, p. 386, 1958.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. O Registro Cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do departamento de geografia**, São Paulo, Brasil, v.6, p.17-29, 2011. DOI: 10.7154/RDG.1992.0006.0002. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47108>. Acesso em: 05 jun. 2022.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do departamento de geografia**, v. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Inundações e deslizamentos em São Paulo. Riscos da relação inadequada sociedade-natureza. **Territorium**, n. 8, p. 15-23, 2001.

RUMELHART, David Everett.; HINTON, Geoffrey Everest.; WILLIAMS, Ronald Learning representations by back-propagating errors. **nature**, v. 323, n. 6088, p. 533-536, 1986.

SAHA, Anik; SAHA, Sunil. Integrating the artificial intelligence and hybrid machine learning algorithms for improving the accuracy of spatial prediction of landslide hazards in Kurseong Himalayan Region. **Artificial Intelligence in Geosciences**, v. 3, p. 14-27, 2022.

Secretaria Municipal do Planejamento Urbano – SEMPLA. **Operação Urbana Água Branca** - Portaria 132/8 de Maio de 2001. Relatório dos estudos de reavaliação crítica e proposição de elementos para elaboração de resolução normativa. São Paulo, 2002.

SÃO PAULO (Cidade). Empresa Municipal de Urbanização - EMURB. **Operação Urbana Água Branca**. São Paulo: PMSP- EMURB, 2013.

SÃO PAULO. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **GeoSampa**. 2021. Disponível em: <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>. Acesso em: 20 ago. 2021.

SAWATZKY, Don; RAINES, G. L.; BONHAM-CARTER, Graeme. Spatial data modeller. **Recuperado de http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM93/source/ReadMe_ArcSDM2009.pdf**, 2009.

SECRETARIA MUNICIPAL DO VERDE E DO MEIO AMBIENTE & INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (SVMA - IPT, 2004). **Geocidade de São Paulo: panorama do meio ambiente urbano**. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo/ SVMA; Brasília: PNUMA, 204 p.

SELBY, Michael John. **Hillslope Materials**. Oxford University Press, 451p, 1993.

SELBY, Michael John. Landslides: causes, consequences and environment. **Journal of the Royal Society of New Zealand**, v. 18, n. 3, p. 343-343, 1988.

SILVA DIAS, Maria Assunção Faus; DIAS, Juliana.; CARVALHO, Leila Maria Vespoli; FREITAS, Edmilson Dias de; SILVA DIAS, Pedro Leite da. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116, p.705-722, 2013

SILVA, Dimas Antonio da. **Zoneamento ambiental de um setor do parque estadual da Cantareira e entorno seccionado pela rodovia Fernão Dias (BR381)**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, Ivan Nunes da; SPATTI, Danilo Hernane; FLAUZINO, Rogério Andrade. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. 2010.

SILVA, Lucia Sousa. **Proteção ambiental e expansão urbana: a ocupação ao sul do Parque Estadual da Cantareira**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, Marcelo José Lopes. **ABC do desenvolvimento urbano**. Bertrand Brasil, 2003.

SUGUIO, Kenitiro et al. Provável significado geológico de idades LOE (luminescência opticamente estimulada) da formação Itaquaquetuba, SP. **Geologia USP. Série Científica**, v. 10, n. 3, p. 49-56, 2010.

SUGUIO, Kenitiro; FÚLFARO, Vicente José; COUTINHO, José Moacyr Vianna. Tipos de contatos e estruturas sedimentares associadas da bacia de São Paulo. **Resumos das Comunicações**, n. Bol. especial 1, p. 25-26, 1971.

SUGUIO, Kenitiro. Geologia do quaternário e a geologia ambiental. **Boletim de Resumos**, p. 20, 1995.

SUGUIO, Kenitiro; MUSSA, Diana. Madeiras fósseis dos aluviões antigos do Rio Tietê, São Paulo: estudos anatômicos e paleoecológicos. **Boletim IG**, v. 9, p. 25-45, 1978.

SWETS, John A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. **Science**, v. 240, n. 4857, p. 1285-1293, 1988.

TAKIYA, Harmi. **Aplicação de métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo**. 1991. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TAKIYA, Harmi. **“ATLAS AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO”**. 2002. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/meio_ambiente/ATLAS%20AMBIENTAL-compactado.pdf. Acesso em: 22 ago. 2021.

TAKIYA, Harmi. **Estudo da sedimentação Neogênico-Quaternário no município de São Paulo: caracterização dos depósitos e suas implicações na geologia urbana**. 1997. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TARIFA, José Roberto, ARMANI, Gustavo. **Unidades climáticas urbanas da Cidade de São Paulo. Atlas Ambiental do Município de São Paulo, Fase I**. São Paulo, 2000. 86 p.

TARIFA, José Roberto; ARMANI, Gustavo. **Os climas naturais**. In: Os Climas de São Paulo. Tarifa, J.R.; Azevedo, T.R. (orgs.). São Paulo, GEOUSP, 2001.

TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende de. **Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática**. 2001.

TASSINARI, Colombo Celso Gaeta. **As idades das rochas e dos eventos metamórficos da porção sudeste do Estado de São Paulo e sua evolução crustal**. 1988. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TASSINARI, Colombo Celso Gaeta; KAWASHITA, Koji; KIKUCHI, Ruy Kenji Papa de. Estudo geocronológico nos metaconglomerados do grupo São Roque, no estado de São Paulo. **Atas**, v. 1, p. 201-208, 1985.

TZELEPIS, N.; LOISIOS, D.; NAKOS, B. A new method of analytical hillshading by using different lighting directions. In: **Proceedings of the 10th National Cartographic Conference, Hellenic Cartographic Society, Ioannina**. 2008.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela. Desastres naturais. **São Paulo: Editora Instituto Geológico**, 2009.

UNDRO. Natural disasters and vulnerability analysis. In: **Report of Experts Group Meeting**. Geneva: UNDRO, 1980.

UOL NOTÍCIAS. **Chuva atrapalha busca a desaparecidos em deslizamento na zona leste de SP; já são 6 mortos**. 2009. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2009/12/04/chuva-atrapalha-busca-a-desaparecidos-em-deslizamento-na-zona-leste-de-sp-ja-sao-6-mortos.htm>. Acesso em: 13 fev. 2021.

USGS. Goals and Tasks of the Landslide Part of a Ground-Failure Hazards Reduction Program, **U.S. Geological Survey Circular 880** (Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 1982).

VAN SCHMUS, William Randal; TASSINARI, Colombo Celso Gaeta; CORDANI, Umberto Giuseppe. Estudo geocronológico da parte inferior do Grupo São Roque. In: **Anais do XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia**. 1986. p. 1399-406.

VAN WESTEN, Cornelis; SEIJMONSBERGEN, Arie Christoffel; MANTOVANI, Franco. Comparing landslide hazard maps. **Natural hazards**, v. 20, p. 137-158, 1999).

VARNES, David Joseph. Slope movement types and processes. **Special report**, v. 176, p. 11-33, 1978.

VARNES, David Joseph. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice, **Natural Hazards**. UNESCO, Paris, 1984.

WANG, Huabin; XU, Weiya.; XU, Ruichun. Slope stability evaluation using back propagation neural networks. **Engineering Geology**, v. 80, n. 3-4, p. 302-315, 2005.

WANG, Yi; FANG, Zhice; HONG, Haoyuan. Comparison of convolutional neural networks for landslide susceptibility mapping in Yanshan County, China. **Science of the total environment**, v. 666, p. 975-993, 2019.

WIDROW, Bernard; LEHR, Michael A. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. **Proceedings of the IEEE**, v. 78, n. 9, p. 1415-1442, 1990.

WOOD, Joseph. **The geomorphological characterization of digital elevation models**. University of Leicester (United Kingdom), 1996.

WP/WLI: (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1993. **A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin International Association of Engineering Geology***, 47: 53-57.

YALCIN, Ali et al. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. **Catena**, v. 85, n. 3, p. 274-287, 2011.

ZÊZERE, José Luís et al. Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. **Science of the total environment**, v. 589, p. 250-267, 2017.

ZHOU, Guiyun; WEI, Hongqiang; FU, Suhua. A fast and simple algorithm for calculating flow accumulation matrices from raster digital elevation. **Frontiers of earth science**, v. 13, p. 317-326, 2019.