

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Carrie Peres Melo

**MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS  
TRANSLACIONAIS RASOS NA BACIA DO RIO PIRAJIBÚ - MIRIM,  
SOROCABA-SP: APLICAÇÃO DOS MODELOS SHALSTAB E REDE NEURAL  
ARTIFICIAL (RNA) NA ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.**

Sorocaba

2021

Carrie Peres Melo

**MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS  
TRANSLACIONAIS RASOS NA BACIA DO RIO PIRAJIBÚ - MIRIM,  
SOROCABA-SP: APLICAÇÃO DOS MODELOS SHALSTAB E REDE NEURAL  
ARTIFICIAL (RNA) NA ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.**

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Geografia  
para obtenção do título de Mestre em  
Geografia.

Linha de pesquisa: Estudos Ambientais e

Análise Espacial

Orientação: Prof. Dr. Erminio Fernandes

Sorocaba

2021

Peres Melo, Carrie

Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos na bacia do Rio Pirajibú - Mirim, Sorocaba-SP: Aplicação dos modelos SHALSTAB e Rede Neural Artificial (RNA) na estimativa de atributos físicos do solo. / Carrie Peres Melo -- 2021. 131f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Erminio Fernandes  
Banca Examinadora: Emerson Martins Arruda, João Osvaldo Rodrigues Nunes  
Bibliografia

1. Landforms. 2. SHALSTAB. 3. Rede Neural Artificial. I. Peres Melo, Carrie. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

**DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR**

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**Centro de Ciências Humanas e Biológicas Programa**  
**de Pós-Graduação em Geografia**

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Carrie Peres Melo, realizada em 15/09/2021.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Erminio Fernandes (UFSCar)

Prof. Dr. Emerson Martins Arruda (UFSCar)

Prof. Dr. João Osvaldo Rodrigues Nunes (UNESP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Geografia.



## **DEDICATÓRIA**

A todas as pessoas que foram prejudicadas por algum movimento de solo.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus por todas as horas que meu deu luz, forças e entendimento.

E a minha família principalmente, ao meu pai Mauro por todas as idas e vindas e por toda a ajuda, até mesmo com os buracos cavados, pela minha querida mãe Marli pelo apoio moral e todas às horas que me ouviu pacientemente explicar meus problemas, ao meu caro irmão Nafis Francisco por todas horas de ajuda pela grande contribuição neste trabalho e em muitas outras situações.

Ao meu professor Erminio Fernandes que sempre me apoiou, mostrando o melhor caminho, sendo paciente e conselheiro.

Todos amigos, primos (Paulo, Katiane, Victória, Stefano, Anne, Jessilyn, Harisson, ...) e professores que me apoiaram de alguma forma.

Ao apoio da Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura de Sorocaba.

E ao apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

## RESUMO

MELO, Carrie Peres. Mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia do Rio Pirajibú-Mirim, Sorocaba-SP: Aplicação dos modelos SHALSTAB e de Rede Neural Artificial (RNA) na estimativa de atributos físicos do solo. Dissertação (Mestrado em Geografia do Programa de Pós-Graduação) – Universidade Federal de São Carlos, *campus de Sorocaba*, Sorocaba - SP, 2021.

A suscetibilidade a movimentos de massa em áreas de declive pode gerar riscos de desastres naturais. Portanto o estudo é de grande importância, com interesse em mitigar danos à vida, materiais, econômicos, ambientais e principalmente em locais povoados, onde pode afetar as pessoas, e o meio social em geral. O objetivo desta pesquisa é identificar as classes de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia do rio Pirajibú-Mirim, município de Sorocaba - SP. Para tanto foi utilizada a Rede Neural Artificial (RNA) para determinar as propriedades físicas do solo. Os mapas morfométricos foram feitos a partir de imagens de Alos Palsar e SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Essas imagens têm resolução de 12,5 e 30 metros, respectivamente. O software utilizado é gratuito e de código aberto SAGA GIS e QGIS. Os procedimentos foram: mapeamento dos atributos do relevo (declividade, orientação de vertentes, textura, convexidade e área de escoamento). Em segundo lugar, a classificação da topografia do terreno gerou dezesseis classes de terreno. Para identificar as áreas de susceptibilidade a escorregamentos foi aplicado o modelo SHALSTAB, utilizando atributos de declividade, área de captação, densidade do solo, coesão, condutividade hidráulica, ângulo de atrito e espessura do solo. Para determinar o ângulo de atrito interno e coesão dos solos foi utilizada a técnica RNA. Como o permeâmetro de Guelph, foi criado para determinar a condutividade hidráulica dos solos in situ. O AHP (*Analytical Hierarchy Process*) foi aplicado para avaliar e visualizar as áreas urbanas em risco. Os resultados obtidos pelas técnicas de RNA, AHP e modelo SHALSTAB foram satisfatórios para a obtenção do mapa das áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos, tanto em áreas urbanas quanto em áreas mais recuadas. A técnica de rede neural artificial permitiu a espacialização dos parâmetros do SHALSTAB, demonstrando o aumento da qualidade dos dados e com resultados mais próximos da realidade. A contribuição desta pesquisa diz respeito ao aumento de dados e disponibilização de resultados. Apoiar o planejamento e operacionalização de ações preventivas e mitigadoras nessas localidades, bem como estimular o aumento do uso de softwares gratuitos e de código aberto.

Palavras-chave: *Landforms*; SHALSTAB; AHP; Rede Neural Artificial; Sorocaba.

## ABSTRACT

The susceptibility to mass movements on slope areas can generate risks of natural disasters. So the study is of great importance, with interest in mitigating damage to life, material, economic, environmental, and especially in populated places, where it can affect people, and the social environment in general. The objective of this research is to identify the classes of susceptibility to shallow translational landslides in the basin of the Pirajibú-Mirim River, city of Sorocaba - SP to achieve this goal was used the Artificial Neural Network (ANN) was to determinate soil physical properties. The morphometric maps were made from images of Alos Palsar and SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). These images have a resolution of 12.5 and 30 meters, respectively. The software used is free and open-source SAGA GIS and QGIS. The procedures were: mapping of the relief attributes (slope, aspect, texture, convexity, and the catchment area). Secondly, the classification of the land topography generated sixteen terrain classes. To identify the landslide susceptibility areas was applied the SHALSTAB model, using attributes of the slope, catchment area, bulk density, cohesion, hydraulic conductivity, angle of friction, and soil thickness. To determine the angle of internal friction, and cohesion of soils the ANN technique was used. Like the permeameter of Guelph, has been created to determine the hydraulic conductivity of soils *in situ*. AHP (Analytical Hierarchy Process) was applied to evaluate and visualize the urban areas at risk. The results achieved by ANN techniques, AHP, and the SHALSTAB model were satisfactory for obtaining the map of the areas susceptible to shallow translational landslides, both in urban areas and in more withdrawn sites. The artificial neural network technique allowed for the spatialization of the SHALSTAB parameters, demonstrating the increase in data quality and with this results closer to reality. The contribution of this research concerns the increase of data and provision of results. Support the planning and operation of preventive and mitigating actions in these locations as well as stimulating the increased use of free and open-source software.

Keywords: Landforms. SHALSTAB. AHP. Artificial Neural Net. Sorocaba.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo SHALSTAB no Brasil.....	19
Figura 2: Divisões da paisagem como o Geossistema.....	23
Figura 3: Classificação unificada, um agrupamento básico.....	30
Figura 4: Classificação aplicada no Rio Claro município de Delfim Moreira – MG.....	35
Figura 5: Permeabilidade e drenagem dos solos.....	37
Figura 6: Total de precipitação anual (2020) da estação da Vila Brigadeiro Tobias.....	40
Figura 7: Fluxograma dos métodos da pesquisa.....	51
Figura 8: Mohr - Coulomb afetada pela umidade.....	54
Figura 9: Plano de resistência.....	56
Figura 10: Esquema da área de drenagem (a) plano e os fluxos hidrológicos.....	57
Figura 11: Gráfico da Fator de Forma C1, C2 E C3.....	59
Figura 12: Permeâmetro de carga constante feito com o Frasco de Marriotte.....	63
Figura 13: Permeâmetro tipo Guelph.....	64
Figura 14: Situação de desenvolvimento da mensuração.....	65
Figura 15: O bulbo de saturação.....	66
Figura 16: RNA.....	69
Figura 17: Fluxograma de mapas.....	72
Figura 18: TWI (Topographic Wetness Index).....	85
Figura 19: Ponto 5, vista da Rua Victor Gomes Corrêa em Brigadeiro Tobias.....	91

Figura 20: Rua Antônio F ratti.....	91
Figura 21: Ponto 2 em detalhe(2021), vista da Rua Santo Eduardo em Brigadeiro Tobias.....	92
Figura 22: Ponto 3 (2021), vista da Rua Santo Eduardo em Brigadeiro Tobias.....	92
Figura 23: Ponto 3 (2004), vista de Rua Santo Eduardo em Brigadeiro Tobias.....	93
Figura 24: Gráfico dos valores médio de Ks e de transmissividade.....	94
Figura 25: Represa do Ferraz nos arredores dos pontos 1, 2 e 3.....	95
Figura 26: O Rio Pirajibú - Mirim nos arredores dos pontos 4 e 5.....	96
Figura 27: Talude nos limites do Bairro de Brigadeiro Tobias.....	97
Figura 28: Talude nos limites da Bairro do Brigadeiro Tobias.....	97
Figura 29: Rede Neural Artificial de coesão.....	100
Figura 30: Rede Neural Artificial do ângulo de atrito interno.....	101
Figura 31: Relação entre o Caso A e B.....	108
Figura 32: A suscetibilidade aplicadas pelas ferramentas SHALSTAB e r.shalstab.....	109
Figura 33: A relação entre suscetibilidade aplicada pelas ferramentas SHALSTAB e r.shalstab.....	110
Figura 34: Relação dos escorregamentos com a AHP.....	113
Figura 35: Relação das zonas com as classes de suscetibilidade.....	114

### **LISTA DE MAPAS**

Mapa 1: Localização.....	39
Mapa 2: Precipitação.....	41

Mapa 3: Geológico.....	43
Mapa 4: Geomorfológico.....	45
Mapa 5: Pedológico.....	46
Mapa 6: Corpos Hídricos.....	49
Mapa 7: Declividade.....	78
Mapa 8: Orientação de vertentes.....	79
Mapa 9: Curvatura de Perfil.....	81
Mapa 10: Convexidade da bacia.....	82
Mapa 11: Escoamento da bacia.....	83
Mapa 12: Textura.....	84
Mapa 13: Formas de Terreno.....	87
Mapa 14: Densidade aparente mínima do solo.....	88
Mapa 15: Densidade aparente máxima do solo.....	89
Mapa 16: Pontos de escorregamento.....	90
Mapa 17: Condutividade hidráulica c Ks.....	98
Mapa 18: Ângulo de atrito interno.....	103
Mapa 19: Coesão.....	104
Mapa 20: Caso A.....	106
Mapa 21: Caso B.....	107
Mapa 22: AHP.....	112

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Tipos de movimento de massa.....	27
Quadro 2 - Tipos de movimento de massa.....	28
Tabela 1 - Coesão.....	32
Tabela 2 - Ângulo de atrito interno .....	33
Tabela 3 – Granulometria dos solos .....	48
Tabela 4 – Tipos de Solo.....	59
Tabela 5 – Classificação do SHALSTAB.....	62
Tabela 6 – Dados de treino da coesão.....	101
Tabela 7 - Dados de treino do ângulo de atrito interno.....	102
Tabela 8 - Dados de teste do ângulo de atrito interno e coesão.....	104
Tabela 9 - Resultados .....	104
Tabela 10 - Parâmetros para aplicação do modelo SHALSTAB .....	107
Tabela 11 - Fatores usados na análise AHP .....	113

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SAGA Sistema de Análises Geocientíficas Automatizado

AHP Analytical Hierarchy Process

SIG Sistema de Informação Geográfica

dSLAM Distributed, Physically Based Slope Stability Model

TRIGRS Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model



SINMAP Stability Index Mapping

SHALSTAB Shallow Slope Stability Model

AQP Algorithms for Quantitative Pedology

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

UFSCar Universidade Federal de São Carlos

UNESP Universidade Estadual Paulista

TWI Índice Topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index*)

NDVI Normalized Difference Vegetation Index

ASTM American Society for Testing and Materials

RNA Rede Neural Artificial

IG Instituto Geológico

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

CEMADEN Centro Nacional de Monitoramentos e Alertas de Desastres Naturais

CBH-SMT Comitê de Bacia Hidrográfica Sorocaba e Médio Tietê

SAAE Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sorocaba

DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica

CEDEC Curso de treinamento de equipes municipais

DEM Modelos Digitais de Elevação

SRTM Shuttle Radar Topography Mission

ANA Agência Nacional de Águas

RC	Razão de Consistência
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente, Parque e Jardins
IP	Índice de Plasticidade
rad	radianos
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
k	Condutividade hidráulica
ks	Condutividade hidráulica saturada
T	Transmissividade
$\sigma$	Tensão normal do solo
$\tau$	Resistência ao cisalhamento
c	Coesão
$\mu$	Pressão neutra
$\phi$	Ângulo de atrito interno
$\rho_s$	densidade aparente do solo
$\rho_w$	densidade da água
g	aceleração da gravidade
h	nível da água abaixo do plano de ruptura
z	profundidade
$\theta$	ângulo de declividade
Q	vazão

A	área do reservatório do Permeâmetro utilizado
R	razão da vazão constante
H	carga hidráulica constante
C	fator de forma adimensional
$\gamma$	neurônios
NN	função <i>neuralnet</i>
rad	radianos

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2. DEFINIÇÕES E MODELOS</b>	<b>22</b>
2.1 Modelo empírico	23
2.2 Movimento de massa	25
2.2.1 Classificação dos movimentos de massa	26
2.2 Estudos dos solos	28
2.3 Hidrologia	36
<b>3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE PESQUISA</b>	<b>39</b>
3.1 Clima	40
3.2 Geologia, geomorfologia e solos	42
3.3 Águas superficiais e subterrâneas	48
<b>4. METODOLOGIA</b>	<b>51</b>
4.1 Modelo SHALSTAB	52
4.2 Trabalho de campo	62
4.3 Rede neural artificial para obtenção dos parâmetros do solo	67
4.4 Análise pelo Processo Hierárquico Analítico (AHP)	70
4.5 Cartografia e sensoriamento remoto	72
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>77</b>
5.1 Dados da bacia a partir dos modelos digitais de elevação	77
5.2 Histórico de escorregamento na bacia de estudo	90
5.3 Condutividade hidráulica $K_s$	93
5.4 Rede Neural Artificial	90
5.5 Suscetibilidade a escorregamentos, comparação entre os dados constantes e espacializados	105
5.5.1 Software GRASS GIS	109

5.6 Análise AHP	111
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>133</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b>	<b>136</b>

## 1. INTRODUÇÃO

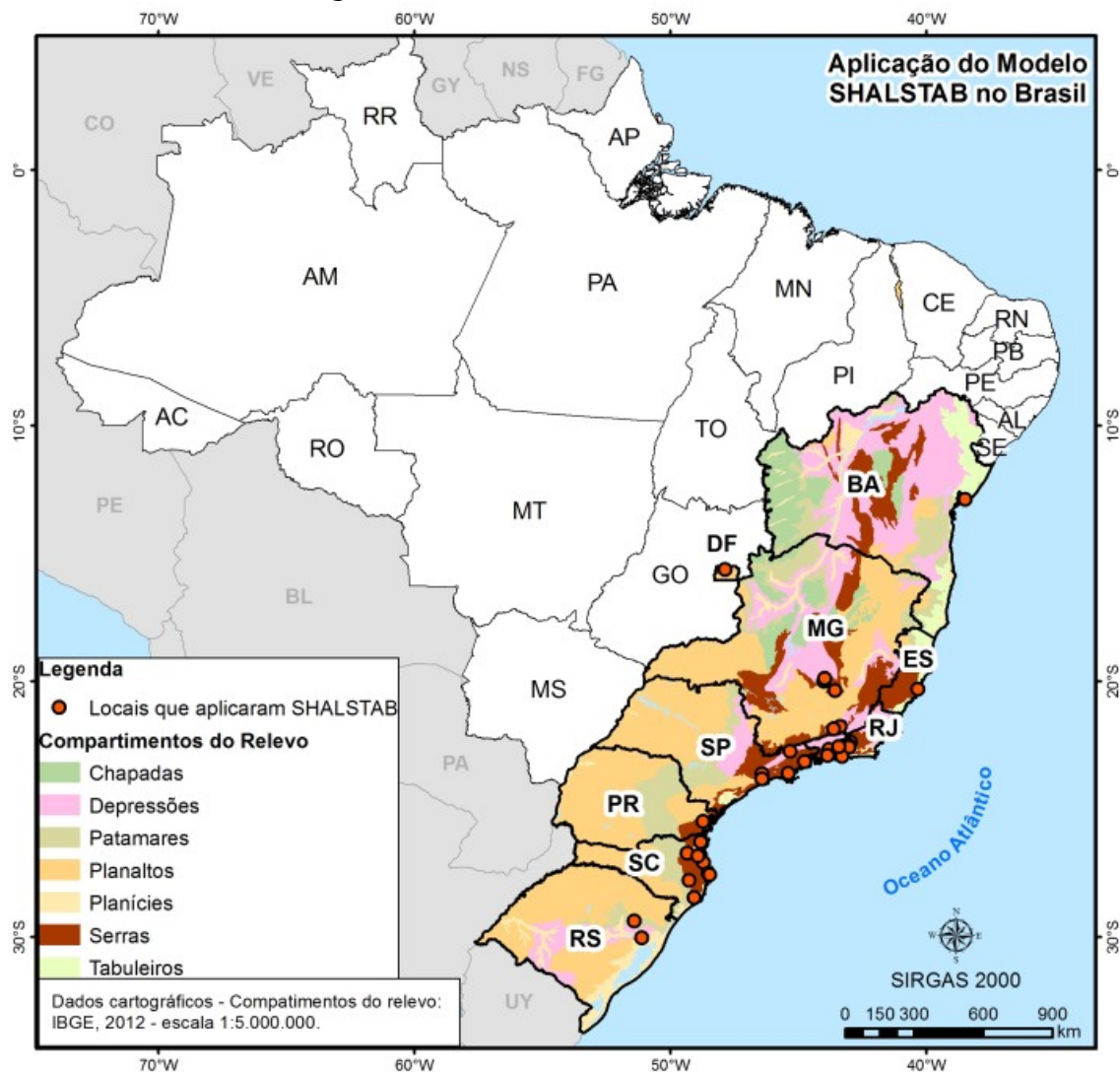
Os impactos causados pela ação humana ao longo dos anos vêm aumentando o desequilíbrio dos sistemas naturais, no geral (VIEIRA, 2010). Os fatores antrópicos decorrentes da forte urbanização, como as estradas, as mudanças no uso do solo, nos sistemas de drenagem, têm conexão com os escorregamentos rasos de terra (PERSICHILLO *et al* 2018). Fatores urbanos como construções inadequadas em áreas de talude onde sofrem cortes sem suporte técnico, análise de estabilidade e com condições sanitárias precárias com isto aumentando a instabilidade gerando um fator de risco de escorregamento (LISTO E VIEIRA, 2012). No geral os desastres ocorridos por movimentos de massa ainda não são compreendidos de forma completa, sendo assim, a sua previsão quase improvável. Entretanto, devido aos desastres no Brasil em diversos estados brasileiros, a necessidade de dados que permitam sua previsão e prevenção vem gerando o crescimento de estudos sobre o tema de maneira significativa (CAROU, 2017; VIEIRA e RAMOS, 2015; NUNES, 2016; GODOY, 2015 e MELO, 2018). No entanto, a falta de dados e cadastros de ocorrências ainda dificultam os estudos (LISTO, 2011).

Vários modelos vêm sendo desenvolvidos por vários países, para os estudos de suscetibilidade a escorregamentos com o objetivo de prever os movimentos de massa. Alguns, especificamente, são baseados em junções de modelos hidrológicos e de estabilidade de taludes tendo como base a modelagem matemática que analisa todos os indicadores de forma a resultar no mapa de áreas suscetíveis a desastres, como por exemplo: dSLAM (*Distributed, Physically Based Slope Stability Model*) (WU e SIDLE, 1995); TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*) (BAUM *et al.*, 2002), SINMAP (*Stability Index Mapping*) (PACK, TARBOTON E GOODWIN, 1998) e SHALSTAB (*Shallow Slope Stability Model*) (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994).

O modelo SHALSTAB no Brasil vem sendo aplicado desde 2002, apresentando-se fortemente nos anos de 2017, 2019, e se expandiu como mostra na Figura 1, pois o modelo, mesmo tendo suas incertezas, é de fácil aplicabilidade e tem apresentado resultados

relevantes sendo empregado com uma boa base de dados e com qualidade da imagem digital de elevação (MELO e KOBIYAMA, 2018), e tem sido apontado como satisfatório por muitos pesquisadores, tais como Godoy (2015), Listo (2016), Nunes (2016), entre outros.

Figura 1: Modelo SHALSTAB no Brasil



Fonte: Melo e Kobiyama, (2018).

O modelo tem se mostrado melhor em comparação com outros modelos como menciona Michel (2014) que, mesmo sendo um modelo de análise inicial, como mencionam diversos pesquisadores (SORBINO, SICA e CASCINI 2010), o SHALSTAB apresenta melhores resultados que o modelo SINMAP, quando comparado às cicatrizes dos

escorregamentos já ocorridos. Por exemplo Baumann (2018) que usa os dois modelos para analisar a possível distribuição das lavas de vulcão no Chile, ao comparar os modelos encontrou que o TRIGRS demonstra a estimativa baseada nas tempestades e áreas instáveis enquanto o SHALSTAB determina os escorregamentos rasos com os efeitos da topografia, podendo saber sua influência, contudo termina constatando que os dois modelos reproduzem bons resultados.

Para obter bons resultados considerar a topografia e suas características no espaço é importante, para isso a determinação de atributos dos solos como o ângulo de atrito interno e a coesão se deu por meio da técnica de Rede Neural Artificial (RNA). Proposta por McCulloch e Pitts (1943) tem sido desenvolvida e aplicada em muitas situações e problemas de matemática, engenharia, medicina, economia, meteorologia entre muitas outras áreas. Especificamente na geotecnia têm Braga (20114), Goktepe *et al* (2008), Iyeke *et al* (2016), Al-Hamed *et al* (2014) e Lal B. e Kiran S. (2016) entre outros.

De acordo com o Instituto Geológico do Estado de São Paulo (IG, 2004), a bacia do Rio Pirajibú-Mirim que se encontra Município de Sorocaba – SP, apresenta casos de movimentação de massa que ocorrem no período de chuvas, tendo sido alguns bairros marcados como de alto risco como os bairros do Brigadeiro Tobias e Vila Astúrias. Para esta pesquisa o mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos é resultado da determinação de atributos dos solos por meio da técnica de Rede Neural Artificial (RNA), do modelo SHALSTAB, relacionado com uma análise de comparação pareada para encontrar as áreas suscetíveis em locais urbanos. Os recursos do Sistema de Informação Geográfica (SIG) mostraram-se essenciais para a verificação dos escorregamentos e movimentações dos solos na bacia hidrográfica, bem como para a aplicação de modelos empíricos através da união de parâmetros do relevo e solo, associados a dados oriundos de trabalhos de campo e dados gerados por RNA.

A presente pesquisa se baseou em questões centrais como:

Quais fatores geram a instabilidade dos solos na bacia?

Quais as áreas de maior suscetibilidade?

Perante as questões acima tem as seguintes hipóteses:



- Os principais fatores foram: a configuração natural da bacia, apresentando áreas com maior declividade, altitude e atributos dos solos (coesão, ângulo de atrito interno, densidade aparente,..). E áreas com ocupações situadas nos locais de declividade e altitude mais acentuada.
- As áreas mais instáveis seriam as áreas envoltas pelos fatores de instabilidade. Entretanto, tendo a possibilidade de áreas vegetadas com alta probabilidade de suscetibilidade a movimentação de massa, estarem estáveis por causa da vegetação. Através da aplicação dos métodos e modelos também dos parâmetros requeridos, será possível constatar as áreas de maior instabilidade na bacia podendo comparar os resultados com as hipóteses.

Esta pesquisa tem o objetivo de mapear e analisar áreas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos, a partir, do modelo SHALSTAB junto aplicação de técnicas de RNA, associado a análise AHP (*Analytical Hierarchy Process*), na bacia do Rio Pirajibú-Mirim, no município de Sorocaba – SP. Tem como objetivos específicos:

- Analisar os dados de condutividade hidráulica mensurados em campo, e os atributos dos solos: ângulo de atrito interno e coesão, obtidos com a Rede Neural Artificial.
- Aplicar o modelo SHALSTAB por meio dos softwares SAGA GIS (*System for Automated Geoscientific Analyses*) e GRASS GIS. Comparar e avaliar os resultados;
- Aplicar o Processo AHP na validação dos pontos de suscetibilidade nas áreas urbanas;
- A partir da associação dos pontos de suscetibilidade gerados pelo SHALSTAB com a AHP, constatar qual setor da bacia apresenta maior aglomeração de áreas com suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos.
- Avaliar os resultados do modelo SHALSTAB, a partir dos parâmetros constantes e espacializados.

## 2. DEFINIÇÕES E MODELOS

Cabe compreender que esta pesquisa integra grande variedade de características naturais intrínsecas, em interação, da bacia hidrográfica do Rio Pirajibú-Mirim e que, portanto, o apoio nas teorias e conceitos foram fundamentais para orientar a escolha da metodologia utilizada e sustentar a discussão crítica dos resultados sobre a dinâmica dos escorregamentos dos solos.

A abordagem ecodinâmica de Tricart (1977), os esquemas de classificação de Sotchava (1977, 1978) e Bertrand (1972), assim como também a contribuição de Hack (1960) sobre o equilíbrio dinâmico na Geomorfologia, permitiram refletir sobre o conceito de equilíbrio na natureza e os ajustes e adaptações dos sistemas e subsistemas. Na discussão sobre o entendimento da paisagem Monteiro (2001), menciona que seu desenvolvimento na geografia e a sustentação do conceito geossistêmico compõe o método de estudo da paisagem que foi o alicerce no Brasil para a aplicabilidade de análise integrada na tentativa de unir o maior número possível de correlações dos distintos atributos na estrutura da paisagem. Sendo na maioria das vezes o Geossistema formado por diferentes paisagens que mostram sua evolução.

Nesta necessidade do estudo múltiplo surge a visão geossistêmica herdada da Teoria Geral dos Sistemas, elaborada em 1937, por Ludwig Von Bertalanffy, para preencher uma lacuna na pesquisa e na teoria da Biologia. O desenvolvimento do conceito de Geossistema deu-se a partir de Sotchava (1977), Strahler (1950), Bertrand (1982), Tricart (1977), Chorley (1957), dentre outros. Os modelos (sistemas) na geografia, especificamente na Geomorfologia, segundo Chorley (1967), podem ser classificados em naturais (ou análogos), físicos e gerais (CULLING, 1957; HAGGETT e CHORLEY, 1967; HACK, 1960; TROPPEMAIR, 1969; CHRISTOFOLETTI, 1979; MONTEIRO, 2001).

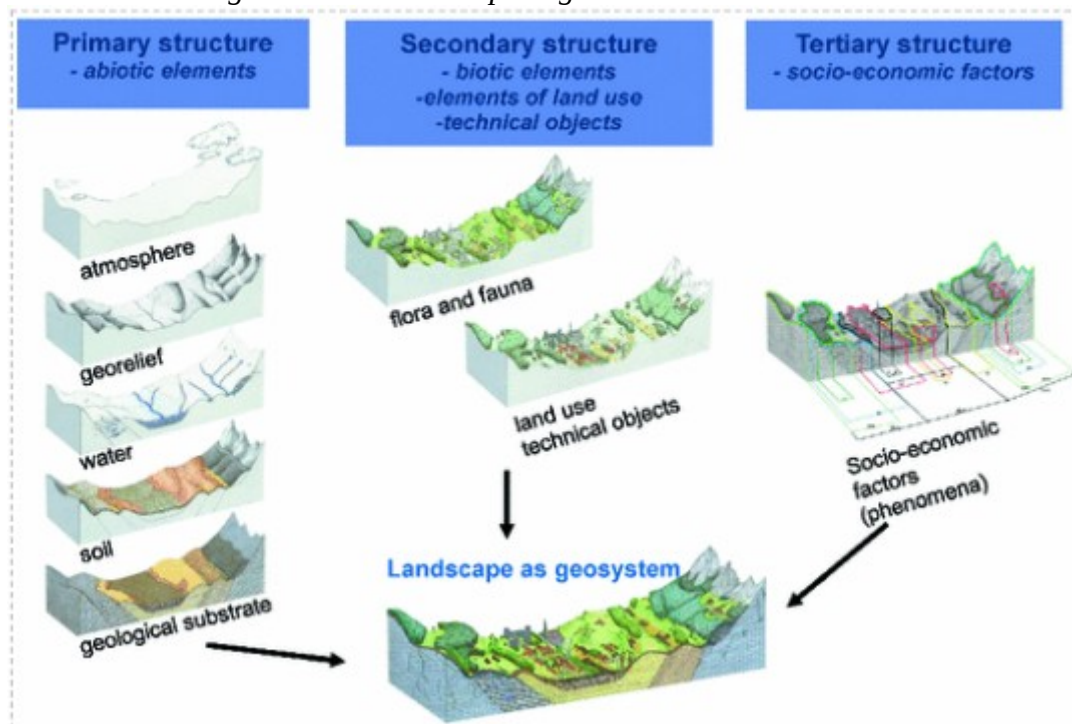
O Geossistema para Sotchava (1978), é uma dimensão do espaço terrestre onde os elementos naturais se conectam sistemicamente, definindo-se, e assim interagindo com a sociedade. Sabendo que o geossistema está contextualizado no espaço geográfico.

Suertegaray (2000) exemplifica o espaço geográfico e sua dinâmica sendo entendido como o disco de Newton, onde cada setor do disco representa uma cor, igualmente ao espaço geográfico sendo representado analiticamente, permitindo ler enquanto paisagem, território, região, ambiente, etc. Sendo a dinâmica do espaço representada pelo movimento giratório do disco que expressa a união das cores.

Sales (2004), diz que no processo metodológico para a identificação de  $n$  variáveis, é necessário conhecer os diversos elementos do relevo, do clima, do solo, da vegetação e a importância destes elementos na dinâmica do meio.

Sobre a noção de interações, Miklos *et al.* (2019) classifica as paisagens em três tipos de estruturas em relação ao todo, esta divisão é feita, primeiramente, com os elementos de base que se dividem em relevo, solo, subsolo, águas e ar. A segunda divisão diz respeito aos elementos onde houve transformação antrópica (fauna e flora, construções, repartições de terra, etc.). Na terceira parte temos a paisagem como um interesse social e econômico que compreende as divisões como áreas de preservação da natureza, áreas industriais, entre outros tipos de função. Estas três divisões são feitas como mostra a Figura 2.

Figura 2: Divisões da paisagem como o Geossistema



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

Nota-se que a estrutura proposta por Miklos *et al.* (2019) tem a visão da paisagem como um Geossistema (*Landscape as geosystem*) como mostra a Figura 2.

## 2.1 Modelo empírico

Vieira e Martins (2016), mencionam que o modelo de equações determinísticas mostra como itens importantes a versatilidade, a estrutura que permite modificações, a velocidade de obter resultados, a precisão na localização dos escorregamentos rasos, a

integração de diversos fatores que teoricamente influenciam na estabilidade das encostas, tais como: coesão dos solos, fluxos de água na encosta e forma da encosta. A análise de sensibilidade do modelo, os pontos de limitação, a qualidade dos dados para manter o modelo, variáveis transferidas em equação discretas de processos contínuos (por exemplo, fluxo de água em encostas), dificuldade de representação matemática de alguns aspetos e processos físicos (por exemplo, estruturas geológicas) e as aproximações necessárias para o seu desenvolvimento e aplicação (por exemplo, considerar somente o fluxo sub superficial paralelo à encosta).

Entretanto, segundo Fernandes (2016), o modelo produzirá um entendimento próximo do comportamento do sistema de maneira simples. Segundo Fernandes (2004), o modelo considera somente a máxima poropressão que ocorre durante uma chuva, considerando a situação mais crítica da visão hidrológica onde pode ocorrer instabilidade de encostas. Fernandes (2011), confirma que modelos de equilíbrio (*steady-state*) como o SHALSTAB, que não leva em consideração o tempo e possui bases matemáticas básicas decorrentes de uma abordagem mais simples, podem ser muito úteis na análise de sistemas ambientais.

Como aponta Haggett e Chorley (1967), todos os modelos têm necessidade frequente de melhora, ligando a importância dos modelos com o nível de abstração. O SHALSTAB não é diferente e vem sendo integrado e analisado de várias formas de percepção.

A rede neural artificial é um dos modelos de representação de redes do ‘*deep learning*’, que vem do ‘*machine learning*’, sendo que primeiramente esses termos surgiram a partir da inteligência artificial. Utiliza um método de aprendizado com os dados de entrada e saída e a estrutura destes, e por causa da sua alta capacidade de previsão, tem se tornado indispensável para muitas aplicações em diversas áreas (MONTAVON, SAMEK e MULLER, 2018).

Com o intuito de analisar locais de urbanos com maior vulnerabilidade em relação às áreas de escorregamento foi adotada nesta pesquisa a técnica da Análise Hierárquica de Processos AHP, é um modelo de tomada de decisão com vantagem de ser simples tendo como base fatores como: tipo de solo, o uso do solo, TWI (*Topographic Wetness Index*) e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Sendo que o TWI é uma aproximação da variação hidrológica da bacia e também da variação espacial da evapotranspiração, uma resposta às limitações econômicas de mensuração in loco (BEVEN e KIRKBY, 1979) e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) que conforme Cruz Flores *et al.* (2020) esta

ferramenta está diretamente ligada aos tipos e distribuição da cobertura vegetal do solo, podendo assim separar as áreas de menor e maior vegetação.

Para se entender o papel dos modelos usados nesta pesquisa, é importante apresentar de antemão alguns conceitos principais abordados nas páginas a seguir.

## 2.2 Movimento de massa

Movimento de massa, uma das ações ligadas às dinâmicas da relação solo-relevo nos geossistemas tropicais (RIOU, 1990), é o movimento do material regolítico superficial de uma vertente causado pela gravidade. Os agentes geológicos como água, vento e gelo atuam, associados à gravidade, causando a movimentação do solo, de acordo com Maley (1987). O processo natural que atua na dinâmica das vertentes, faz parte da evolução geomorfológica em regiões serranas, como no sul e sudeste do Brasil (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL 2009). Consonante com Lepsch (2010), a erosão causada pelo escoamento das águas é a mais importante ocorrendo de duas formas, pela degradação do solo pelo impacto da água da chuva e o fluxo que escorre pela superfície que arrasta e desagrega o solo.

Segundo Florence (2018), em Hong Kong mais de 300 ocorrências são geradas, sendo que a maior parte deles se concentram no período de fortes tempestades e em áreas com pouca interferência humana. Entretanto, aqui no Brasil, os desastres ocorridos por conta da urbanização são previsíveis, como mostra Canil (2017).

Segundo Milligan (2005), na geomorfologia urbana, os movimentos de massa e a instabilidade de taludes, apesar de ter uma componente natural, é frequentemente induzido por ações humanas como:

1. Inclinação de taludes para estradas e outras estruturas, exploração de pedreiras, remoção de muros de contenção e abaixamento de reservatórios.
2. Adição de peso por aterros, estoque de minério ou rocha, estacas de resíduos e construção de edifícios pesados e outras estruturas.
3. Vazamento de água de tubulações, esgotos, canais e reservatórios.
4. Vibrações de explosões, maquinaria, tráfego rodoviário e aéreo.

5. Diminuição do suporte subjacente por mineração, perda de força ou falha e/ou extração do material subjacente. (MILLIGAN, 2005, p. 763-764, tradução própria).

Conforme a citação acima, entendemos que as ações humanas induzem a ocorrência de escorregamentos. Entendendo que a intensidade das chuvas e as propriedades dos solos tem relação direta com os escorregamentos, vemos que na construção de uma estrada, por exemplo, também ocorrem processos que aumentam a suscetibilidade, tal como o aumento da declividade de uma encosta, por exemplo (IRIGARAY *et al.*, 2000).

### **2.2.1 Classificação dos movimentos de massa**

A classificação dos movimentos de massa é de grande importância, pois ela será a base mecânica do fenômeno a ser estudado, como fez Terzaghi (1928, 1950). A classificação mais usada mundialmente é a de Varnes (1984) que define os tipos de movimentos, dispostos no Quadro 1.

QUADRO 1 – TIPOS DE MOVIMENTO DE MASSA

Tipos de Movimentos		Base - Rocha	Engenharia dos Solos	
			Partículas grossas	Partículas finas
Queda		Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de solo
Tombamento		Tombamento de rochas	Tombamento de detritos	Tombamento de detritos
Escorregamento	Tipos de Movimentos Base - Rocha Rotacional (poucas unidades)	Escorregamento de rocha ( <i>slump</i> )	Escorregamento de detritos	Escorregamento de solo
	Translacional (muitas unidades)	Escorregamento de blocos de rocha	Escorregamento de blocos de detritos	Escorregamento de blocos de solo
		Escorregamento de rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamento de solo
Espalhamento Lateral		Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos	Espalhamento de solo
Fluxo		Fluxo de rocha (rastejamento oculto)	Fluxo de detritos (rastejamento de solo)	Fluxo de solo
Complexo		Combinação de dois ou mais tipos de movimento principal		

Fonte: Varnes (1984)

Geralmente o tipo de movimento de massa é a base de um modelo, o que promove a elaboração de várias definições (VARNES, 1954 e 1978; CRUDEN e VARNES, 1996; HUTCHINSON, 1968 e 1988; DIKAU, 1996).

Em conformidade com as definições citadas, uma das classificações mais recentes foi proposta por Hungh (2013) (Quadro 2). Que visa uma classificação mais simples e objetiva.

Considerando Guidicini e Nieble (1984), que os movimentos rotacionais estão ligados a um ambiente de solos profundos, e os translacionais rasos com plano de ruptura abrupta, planar, e ocorre por precipitação intensa.

QUADRO 2 – TIPOS DE MOVIMENTO DE MASSA

<b>Tipos de Movimentos</b>	<b>Rocha</b>	<b>Solo</b>
Queda	Queda de rocha / gelo	Queda de pedregulho, detritos e lodo
Tombamento	Tombamento de rochas	Tombamento de cascalho, areia e lodo
	Tombamento flexural de rochas	
Escorregamento	Escorregamento rotacional	Escorregamento rotacional de argila e silte
	Escorregamento planar ou translacional	Escorregamento plano de argila e silte
	Escorregamento em cunha	Escorregamento em cunha de cascalho, detrito e areia
	Escorregamento composto	Escorregamento composto de argila e silte
	Escorregamento irregular	
Fluxo	Avalanche de rocha / gelo	Fluxo seco de areia, silte e detritos Fluxo de escorregamento de de areia, silte e detritos Afluir de detritos Avalanche de detritos Fluxo de terra Fluxo de turfa
Deformação de Declive	Deformação de vertentes Deformação de encostas	Deformação de solo em declive Rastejamento de solo Solifluxão

Fonte: Hungh (2013)

De acordo com o Quadro 2 e consonante com Hungh (2013), define-se os

movimentos como: Quedas, Tombamentos, escorregamentos, Espalhamento, Fluxo e a Deformação de declive. Nota-se que nesta classificação não se tem os Movimentos Complexos, pois de acordo com Hungh (2013) os movimentos complexos dispostos no Quadro 1, não são práticos, pois todo movimento de massa pode ser complexo.

### 2.3 Os Estudos dos Solos

Definida por Earle (2019), a geologia estuda a terra, sua superfície interior e exterior, as rochas, o processo de formação destes materiais, o fluir da água na superfície e no subterrâneo e as mudanças relacionadas com o tempo geológico. Especificamente, podemos considerar o solo, esta fina camada entre a atmosfera e a litosfera e que é fundamental para nossa existência, tendo o clima como uma importante parte neste processo.

O solo foi inicialmente estudado por Bacon em 1622 que viu a capacidade do solo de reter água, sendo o principal nutriente para as plantas. Também houve trabalhos importantes como Coulomb, em 1773, Schubler, 1833, Rankine, 1856 e Darcy, 1856 que analisaram as propriedades físicas do solo. Já Dokuchaev em 1883, compreende o solo como um corpo natural formado pela ação de um grupo de agentes, percebendo a influência do clima nos horizontes.

Considerando que o clima no solo é diferente do clima da atmosfera, nele os fatores como quantidade de radiação solar, transparência da atmosfera, ângulo de incidência e duração da luz e variação de temperatura são elementos determinantes na variação dos solos. Por exemplo, os solos nas regiões tropicais são considerados como os com mais atividades de intemperismo no mundo (LEPSCH, 2002).

Entendemos que o solo é constituído por parte de volume sólido (matriz) e parte por vazios que podem ser água ou ar. Seu comportamento é definido por causa destes elementos trifásicos (sólido, ar, água), que normalmente ocorrem no solo, mesmo que em alguma hipótese, possa todos os vazios serem preenchidos com água (PINTO, 2006). Este comportamento pode ser delimitado pelos limites de consistência, por exemplo o limite de liquidez que é o ponto onde o solo perde a capacidade de fluir por estar com menor porcentagem de água ficando assim mais rijo, entretanto pode ser encontrado o estado de plasticidade que é o quanto um solo pode ou não ser moldado, mas com uma constante perda de umidade podemos ver o limite de plasticidade que é quando o solo (por exemplo um solo com maior porcentagem de areia) começa a se desintegrar (COUTO, PEREIRA, GOMES E FERREIRA, 2016).



Com a verificação dos índices de Atterberg (limites de consistência, limite de liquidez e o limite de plasticidade) e a composição granulométrica dos solos podemos ter a classificação dos solos, pois como Terzaghi menciona que “*uma classificação sem índices numéricos é totalmente inútil*” (PINTO, 2006). Inicialmente tem o sistema criado por Casagrande (1948) e então a classificação unificada exposta na Figura 3, que os solos como areia e cascalho são classificados pelo tamanho do grão, já a argila e o silte foram classificadas pelos limites de plasticidade e liquidez (CARTER e BENTLEY,1991). Sendo os dados de granulometria padrão para cada classe como exposto a partir da ASTM D2488 (2015) com ajuda das ferramentas oferecidas pela empresa Groundlogs<sup>1</sup>.

<sup>1</sup><https://groundlogs.online/log-drafting/logging-free-tools/>

Figura 3: Classificação unificada, um agrupamento básico

Major divisions			Typical names	Group symbols
Coarse grained soils More than half of material is larger than 75µm sieve size	Gravels More than half of coarse fraction is larger than No. 4 sieve size	Clean gravels (little or no fines)	Well graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	GW
			Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	GP
		Gravels with fines (appreciable amount of fines)	Silty gravels, poorly graded gravel-sand-silt mixtures	GM
			Clayey gravels, poorly graded gravel-sand-clay mixtures	GC
	Sands More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size	Clean sands (little or no fines)	Well graded sands, gravelly sands, little or no fines	SW
			Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines	SP
		Sands with fines (appreciable amount of fines)	Silty sands, poorly graded sand-silt mixtures	SM
			Clayey sands, poorly graded sand-clay mixtures	SC
Fine grained soils More than half of material is smaller than 75µm sieve size	Silts and clays liquid limit less than 50		Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands with slight plasticity	ML
			Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	CL
			Organic silts and organic silt-clays of low plasticity	OL
	Silts and clays liquid limit greater than 50		Inorganic silts, micaceous or dictomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts	MH
			Inorganic clays of high plasticity, fat clays	CH
			Organic clays of medium to high plasticity	OH
Highly organic soils			Peat and other highly organic soils	Pt

Fonte: Carter e Bentley (1991).

Com a classificação unificada tem-se os parâmetros de coesão publicados pela Associação Suíça de Engenharia de Estradas e Tráfico (VSS, 1999), que foram feitos 6000

testes laboratoriais, onde foram analisados os parâmetros de cada tipo de solo a partir da classificação (BAYRAKTARLI, 2006) e também foram usados dados do Departamento de Transporte de Minnesota (2007), do Manual de Design de Fundação e Estruturas de Terra do Comando de Engenharia de Instalações Navais (1988) com isso temos a Tabela 1.

TABELA 1 - COESÃO

Description	USCS	Cohesion [kPa]		Specific value
		min	max	
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	-	-	0
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	-	-	0
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	-	-	0
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	-	-	20
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	-	-	0
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	-	-	0
Silty sands	SM	-	-	22
Silty sands - Saturated compacted	SM	-	-	50
Silty sands - Compacted	SM	-	-	20
Clayey sands	SC	-	-	5
Clayey sands - Compacted	SC	-	-	74
Clayey sands -Saturated compacted	SC	-	-	11
Loamy sand, sandy clay Loam - compacted	SM, SC	50	75	
Loamy sand, sandy clay Loam - saturated	SM, SC	10	20	
Sand silt clay with slightly plastic fines - compacted	SM, SC	-	-	50
Sand silt clay with slightly plastic fines - saturated compacted	SM, SC	-	-	14
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	-	-	7
Inorganic silts and clay's silts - compacted	ML	-	-	67
Inorganic silts and clay's silts - saturated compacted	ML	-	-	9
Inorganic clay's, silty clay's, sandy clay's of low plasticity	CL	-	-	4
Inorganic clay's, silty clay's, sandy clay's of low plasticity - compacted	CL	-	-	86
Inorganic clay's, silty clay's, sandy clay's of low plasticity - saturated compacted	CL	-	-	13
Mixture if inorganic silt and clay - compacted	ML-CL	-	-	65
Mixture if inorganic silt and clay - saturated compacted	ML-CL	-	-	22
Organic silts and organic silty clay's of low plasticity	OL	-	-	5
Inorganic silts of high plasticity - compact	MH	-	-	10
Inorganic silts of high plasticity - saturated compacted	MH	-	-	72
Inorganic silts of high plasticity	MH	-	-	20
Inorganic clay's of high plasticity	CH	-	-	25
Inorganic clay's of high plasticity - compacted	CH	-	-	103
Inorganic clay's of high plasticity - saturated compacted	CH	-	-	11

Organic clay's of high plasticity	OH	-	-
Loam - Compacted	ML, OL, MH, OH	60	90
Loam - Saturated	ML, OL, MH, OH	10	20
Silt Loam - Compacted	ML, OL, MH, OH	60	90
Silt Loam - Saturated	ML, OL, MH, OH	10	20
Clay Loam, Silty Clay Loam - Compacted	ML, OL, CL, MH, OH, CH	60	105
Clay Loam, Silty Clay Loam - Saturated	ML, OL, CL, MH, OH, CH	10	20
Silty clay, clay - compacted	OL, CL, OH, CH	90	105
Silty clay, clay - saturated	OL, CL, OH, CH	10	20
Peat and other highly organic soils	Pt	-	-

Fonte: Modificado de Geotechdata (2013-2021).

Para os dados de coesão, além da classificação unificada, foram utilizados como base os dados de GALSTER (1989), MEYERHOF, (1956), PECK, HANSON e THORNBURN (1974), OBRZUD, R. e TRUTY (2012); Associação Suíça de Engenharia de Estradas e Tráfico (VSS, 1999), e do Departamento de Transporte de Minnesota (2007), formando assim a Tabela 2.

TABELA 2 - ÂNGULO DE ATRITO INTERNO

Soil friction angle [°]				
Description	USCS	min	max	Specific value
Well graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GW	33	40	
Poorly graded gravel, sandy gravel, with little or no fines	GP	32	44	
Sandy gravels - Loose	(GW, GP)			35
Sandy gravels - Dense	(GW, GP)			50
Silty gravels, silty sandy gravels	GM	30	40	
Clayey gravels, clayey sandy gravels	GC	28	35	
Well graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SW	33	43	
Well-graded clean sand, gravelly sands - Compacted	SW	-	-	38
Well-graded sand, angular grains - Loose	(SW)			33

Well-graded sand, angular grains - Dense	(SW)			45
Poorly graded sands, gravelly sands, with little or no fines	SP	30	39	
Poorly-graded clean sand - Compacted	SP	-	-	37
Uniform sand, round grains - Loose	(SP)			27
Uniform sand, round grains - Dense	(SP)			34
Sand	SW, SP	37	38	
Loose sand	(SW, SP)	29	30	
Medium sand	(SW, SP)	30	36	
Dense sand	(SW, SP)	36	41	
Silty sands	SM	32	35	
Silty clay's, sand-silt mix - Compacted	SM	-	-	34
Silty sand - Loose	SM	27	33	
Silty sand - Dense	SM	30	34	
Clayey sands	SC	30	40	
Clayey sands, sandy-clay mix - compacted	SC			31
Loamy sand, sandy clay Loam	SM, SC	31	34	
Inorganic silts, silty or clayey fine sands, with slight plasticity	ML	27	41	
Inorganic silt - Loose	ML	27	30	
Inorganic silt - Dense	ML	30	35	
Inorganic clay's, silty clay's, sandy clay's of low plasticity	CL	27	35	
Clay's of low plasticity - compacted	CL			28
Organic silts and organic silty clay's of low plasticity	OL	22	32	
Inorganic silts of high plasticity	MH	23	33	
Clayey silts - compacted	MH			25
Silts and clayey silts - compacted	ML			32
Inorganic clay's of high plasticity	CH	17	31	
Clay's of high plasticity - compacted	CH			19
Organic clay's of high plasticity	OH	17	35	
Loam	ML, OL, MH, OH	28	32	
Silt Loam	ML, OL, MH, OH	25	32	
Clay Loam, Silty Clay Loam	ML, OL, CL, MH, OH, CH	18	32	
Silty clay	OL, CL, OH, CH	18	32	
Clay	CL, CH, OH, OL	18	28	
Peat and other highly organic soils	Pt	0	10	

Fonte: Modificado de Geotechdata (2013-2021).

Além da classificação (Figura 3) e parâmetros dos solos (Tabelas 1 e 2) temos, por exemplo, o modelo SHALSTAB, que combina um modelo de estabilidade com o modelo hidrológico, tendo a formação do solo e o transporte de material pedológico, como parâmetros para prever sua espessura (DIETRICH et al., 1995). Estas suscetibilidades ocorrem em locais que apresentam maior declividade, entre os horizontes O, A e B, sendo que o leito rochoso pode variar de forma inesperada. Normalmente o solo apresenta baixa

densidade aparente e falta de coesão quando muito saturado (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998).

A pedometria e a modelagem matemática e estatística, descreve os solos podendo fazer sua descrição (MCBRATNEY *et al.* 2000) tendo a pedometria e pedologia unidas desenvolvidas concomitantemente (TEN CATEN *et al.* 2012) e através disto entender os processos de formação dos solos e características do relevo (KLINGEBIEL *et al.*,1987).

Estes modelos solo-relevo, podem ser combinados com o SIG e técnicas de inteligência artificial (MENDONÇA – SANTOS e SANTOS, 2003). Para o mapeamento digital dos solos usa-se imagens de sensoriamento remoto e os modelos digitais de elevação, pontuando o segundo de onde são extraídos os atributos topográficos (declividade, convexidade, orientação de vertentes entre vários outros) e com isto podem ser determinadas as classes pedológicas (DOBOS *et al.*, 2000; MCKENZIE *et al.*, 2000).

Estes modelos, métodos de classificação, vêm crescendo conforme diversos trabalhos (HAMMOND 1954,1964; DIKAU 1989, 1990; DIKAU *et al.* 1991), (ENGELEN FE DIJKSHOORN 1991, 2013), (SIRTOLI, A. E. *et al.* 2008), (SILVEIRA e SILVEIRA, 2015), (TEN CATEN *et al.*, 2012); Geobia – Segmentação Automática de Imagens (DRAGUT e BLASCHKE 2006, BLASCHKE e DRAGUT 2006, EISANK, DRAGUT e BLASCHKE, 2011), Classificação não supervisionada, localmente adaptada (IWAHASHI e PIKE 2007; IWAHASHI *et al.* 2018), Maybeck, Green e Vorosmarty, 2001 e Jasiewicz e Stepinski, 2013.

Recentemente, demonstrando o uso da pedometria e pedologia, Beaudette *et al.* (2013) usam o pacote estatístico AQP<sup>2</sup> (*Algorithms for Quantitative Pedology*) no programa RStudio, dando base para várias funções, análises do solo como interpolações, comparações e padronização dos horizontes e perfis.

Através de uma leitura automática de atributos do terreno, proposta e aprimorada por Iwahashi e Pike (2007), a classificação dos atributos do terreno se deu através de uma combinação sequencial binária da escala de cinza que tem por variáveis três parâmetros morfométricos: declividade, convexidade e textura. Elaborada em 2007 e integrada ao software SAGA GIS como ferramenta, tendo assim fácil aplicabilidade (MELO e

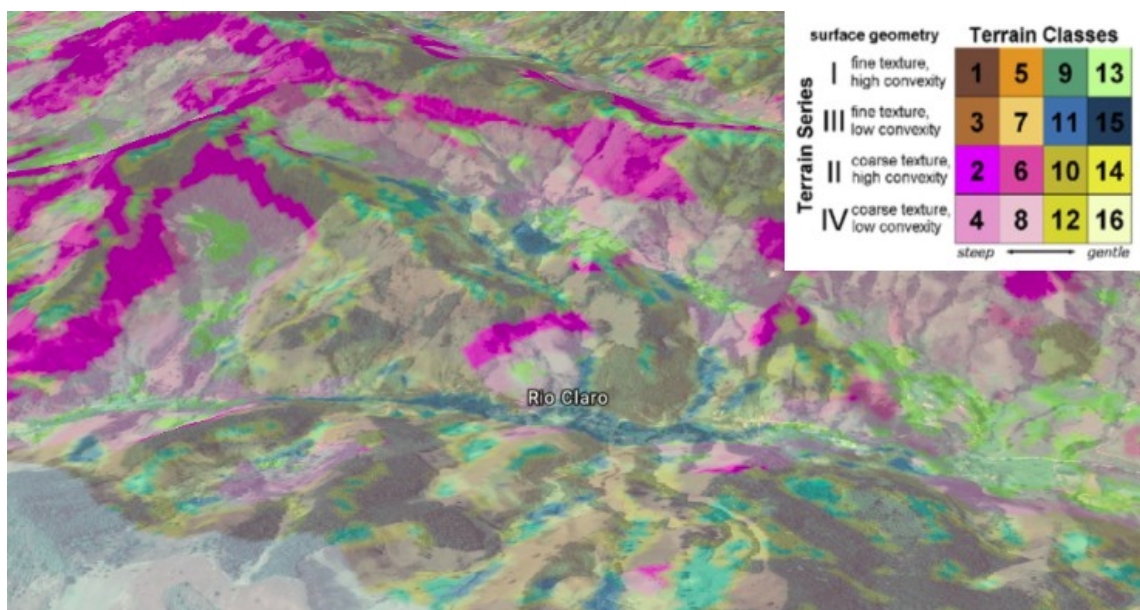
2Biblioteca APQ: <http://cran.r-project.org/web/packages/aqp>, <http://aqp.r-forge.r-project.org>

FERNANDES, 2019 e TRENTIN e ROBAINA, 2020). Através desta leitura automática de atributos do relevo, poderemos analisar os tipos de terrenos da área estudada, classificando a bacia em 16 classes.

Iwahashi e Pike (2007) citam que na classe 16, estão as áreas de planície, recentes áreas aluvionares, leque aluvial e áreas de inundação. Nas classes 12 e 14 planícies de declividade suave e também áreas de leque aluvionar como apresenta na classificação feita no Japão e EUA. As classes 1 e 3 são geralmente locais de alta convexidade, área montanhosa de declive, a classe 1 geralmente fica localizada acima da classe 3 se caracterizando em áreas úmidas e como da série I e III, onde se tem as classes 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 e 15 áreas marcadas por uma topografia erosional. As áreas das séries II e IV são recentes superfícies de sedimentação com classes de planícies como a classe 16, baixa declividade na classe 12 e 14, grandes leques aluviais, leques dissecados, montanhas com falhamentos (*block-faulted mountain*) e rochas cristalinas distribuídas nas classes 2, 4, 6 e 8.

Um exemplo desta classificação, é mostrado no município de Delfim Moreira – MG, na Figura 4. Ao longo do curso do Rio Claro, presente neste exemplo, observa-se claramente as classes : 2 (série II), 4 (série IV), 1 e 3 (séries I e III), 10, 14 e 12 (II e IV) e as áreas azul da classe 11 e 15 (série III).

Figura 4: Classificação aplicada no Rio Claro município de Delfim Moreira – MG



Fonte: Elaborado pela autora.

As séries são geralmente distribuídas de maneira, que podemos ver as áreas estáveis mais antigas das séries II e IV (como exposto nas áreas classe 2), áreas erosionais como por exemplo as áreas da classe 1, e as áreas aluvionares onde passa o Rio Claro e recentes áreas de aluvião e/ou inundação (superfícies da classe 11, 15 e 16).

Notando que estas classificações não excluem, mas consideram a análise pedológica do solo estudado, como mostra nas análises no Japão e EUA (IWAHASHI e PIKE, 2007).

Stabile e Vieira (2009) citam que os parâmetros como a convexidade, hipsometria e o ângulo da encosta são importantes para entender a bacia e suas regiões. O atributo do terreno, declividade, é um fator de condição para os processos de forma e estrutura (SCCOTI, ROBAINA e TRENTIN, 2016).

Nicu e Asăndulesei (2018) usam onze parâmetros como fatores de condição, ou seja, estabelece valores para ambientes semelhantes, sendo estes o ângulo da encosta, hipsometria, curvatura, litologia, precipitações, uso do solo, índice topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index*), formas de terreno (*Landforms*), orientação de vertentes, plano de curvatura e a distância até o rio, sendo estes fatores usados para determinar a susceptibilidade de escorregamentos usando os modelos como Razão de Frequência (*Frequency Ratio*), Índice estatístico (*Statistical Index*) e o AHP.

### 2.3 Hidrologia

A hidrologia é a ciência que estuda a movimentação e distribuição da água em subsuperfície, superfície e/ou na atmosfera. O ciclo da água se refere à entrada, saída e movimentação da água, suas propriedades e relação com o meio (ADLER E TANNER, 2015 p.120). É necessário conhecer a dinâmica da bacia, entender as interações entre os elementos, das drenagens superficiais, os elementos da topografia local, suas características físicas e as intervenções da sociedade (MACHADO E TORRES, 2013).

Para entender o mecanismo dos escorregamentos precisamos compreender o comportamento da precipitação local, pois encontra-se diretamente ligada a intensidade e concentração da chuva ((SBROGLIA, REGINATTO, HIGASHI E GUIMARÃES, 2018). Apresenta-se também a necessidade de compreender a bacia hidrográfica como a área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial (COELHO-NETO, 2007, p.17).

Parte da água é precipitada sobre o solo e escoar, evapora e infiltra. O local de maior infiltração geralmente corresponde ao início da bacia, à montante, onde se tem maior



probabilidade de escorregamentos, e nas áreas ao final da bacia, à jusante, com declives suaves, ficam as áreas estáveis (LISTO E CARVALHO VIEIRA, 2010).

Geralmente os solos são mais condutivos que o leito rochoso (*bedrock*) devido à maior porosidade do solo, no entanto vários autores dizem que o leito rochoso fraturado pode conduzir grande fluxo de água de chuva (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998; WILSON e DIETRICH, 1987; MONTGOMERY *et al.*, 1997; JOHNSON e SITAR, 1989).

As águas de infiltração, ou águas subterrâneas, penetram nos poros dos solos e dos sedimentos ou nas fraturas e falhas das rochas, migrando para as zonas mais profundas onde se vão acumulando e saturando os espaços vazios, formando os mananciais subterrâneos, chamados aquíferos. Quando os solos ou sedimentos são mais argilosos, as águas subterrâneas atuam principalmente nos processos de escorregamento: quanto maior a taxa de infiltração e a altura do nível freático, maior a suscetibilidade do terreno para deslizar. Por outro lado, quando o material é muito arenoso, quanto maior a infiltração e mais alto o nível freático, maior a probabilidade de erosão acelerada com a formação de voçorocas. (ALHEIROS *et al.*, 2003, p.51).

Pois os aquíferos que são compostos por rochas ígnea e metamórficas, com fluxo subterrâneo causado pelas fissuras e porosidades, geralmente é resistente, mas quando se tem fissuras o fluxo pode ser rápido (MAYS, 2005).

Para entender o fluxo do solo, a condutividade hidráulica (*k*) é um coeficiente de permeabilidade da água no solo que se diferencia, dependendo do solo (Figura 5). É a taxa ou coeficiente do fluxo de água que passa em uma seção transversal de uma área sobre um gradiente hidráulico.

Figura 5: Permeabilidade e drenagem dos solos

		Coefficient of Permeability <i>k</i> (m/s)											
		10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Drainage		Good					Poor			Practically Impervious			
Soil types	Clean gravel	Clean sands, clean sand and gravel mixtures				Very fine sands, organic and inorganic silts, mixtures of sand silt and clay, glacial till, stratified clay deposits, etc.				"Impervious" soils, e.g., homogeneous clays below zone of weathering			
					"Impervious" soils modified by effects of vegetation and weathering								

Fonte: Terzaghi, Peck e Mesri, 1996.

Como o gradiente hidráulico é adimensional a condutividade hidráulica tem unidade de velocidade (m/s), e é inversamente proporcional à viscosidade da água ou seja, o aumento de temperatura diminui o coeficiente de permeabilidade  $k$ , e pode mudar muito dependendo dos vazios e pressão nos solos (TERZAGHI, PECK E MESRI,1996).

No Rio de Janeiro, Bielschowsky *et al.* (2012) ao mensurar a condutividade hidráulica obteve em argissolos um valor entre  $10^{-8}$  m/s  $10^{-7}$  m/s. Já Gomes e Vieira (2016) obtiveram com o permeâmetro de Guelph valores de condutividade hidráulica, nas cicatrizes, entre  $10^{-4}$  e  $10^{-6}$  m/s.

Relacionado com a condutividade hidráulica temos a transmissividade (T), que indica a capacidade de transmissão da água através de uma espessura de solo. Ou seja, a transmissividade é igual à razão entre a condutividade hidráulica e uma seção saturada (MAYS, 2005).

A evapotranspiração real (ETr) é o que realmente acontece não dependendo somente dos dados meteorológicos, mas também das características do solo e orientação de vertentes do uso, já a evapotranspiração potencial (ETp) é estimada somente por dados meteorológicos (THORNTHWAITE E MATHER, 1957).

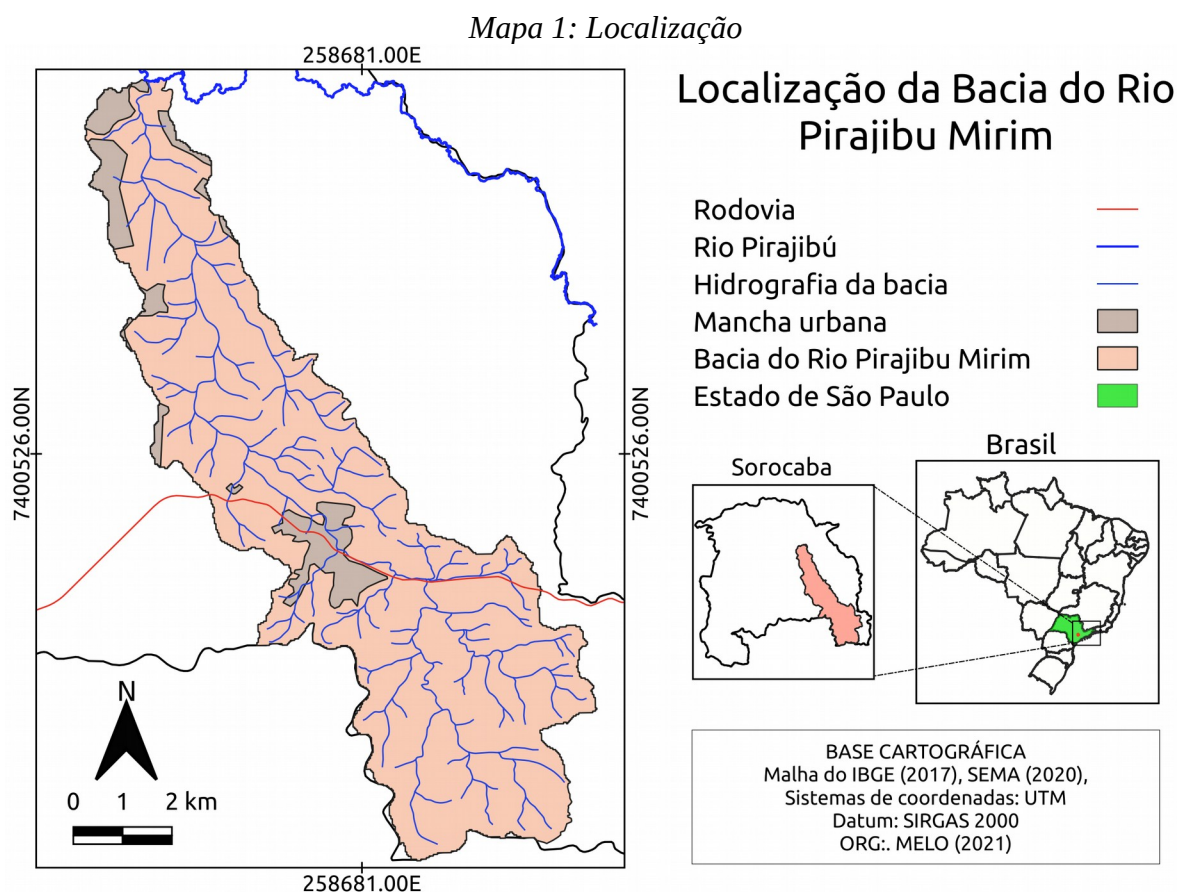
Nas áreas urbanizadas a hidrologia urbana apresenta características distintas, segundo Lima (2010), onde se tem grande predominância de áreas impermeáveis e formações artificiais de terreno. Geralmente este estudo é desenvolvido para entender o impacto do desenvolvimento urbano no transcurso da água e como mitigar ocorrências desastrosas decorrentes da urbanização (cheias, inundações, escorregamento de taludes).

Machado e Torres (2013) apontam que as áreas urbanas podem reduzir o tempo de concentração do escoamento da água na bacia. Entretanto consonante com Nunes *et al.* (2016) os tipos de vertentes (curvatura) interferem no escoamento.

Vasconcelos, Vieira *et al.* (2018) usam as zonas molhadas para encontrar a susceptibilidade a movimentos de massa e compreender a hidrodinâmica da bacia. Estas áreas molhadas são zonas de interseção muito suscetível a enchentes, assim como as áreas côncavas das vertentes, por exemplo, tem concentração de umidade e pode se tornar instável causando movimento de massa.

### 3. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE PESQUISA

A área de estudo, a bacia do Rio Pirajibú-Mirim, situa-se no Município de Sorocaba, como mostrado no Mapa 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

O município de Sorocaba localiza-se no interior do estado de São Paulo, na região Sudeste do Brasil. Tem uma área de 450,382 km<sup>2</sup>, estimando 687.357 habitantes segundo o IBGE (2020). Também se constitui em uma das regiões do estado de São Paulo com maiores índices de preservação de vegetação nativa, graças à existência de um número considerável de unidades de conservação como parques estaduais, estações ecológicas, florestas estaduais, florestas nacionais e áreas de proteção ambiental.

A área da bacia do Rio Pirajibú-Mirim, conforme o IG - Instituto Geológico (2004), situa-se nas zonas sudeste e leste do Município de Sorocaba. Conforme Corrêa, Toledo e Franco (2016) a bacia do Rio Pirajibú-Mirim é uma área de importância pelos seus recursos

hídricos, para a distribuição de água em Sorocaba e por conectar fragmentos florestais.

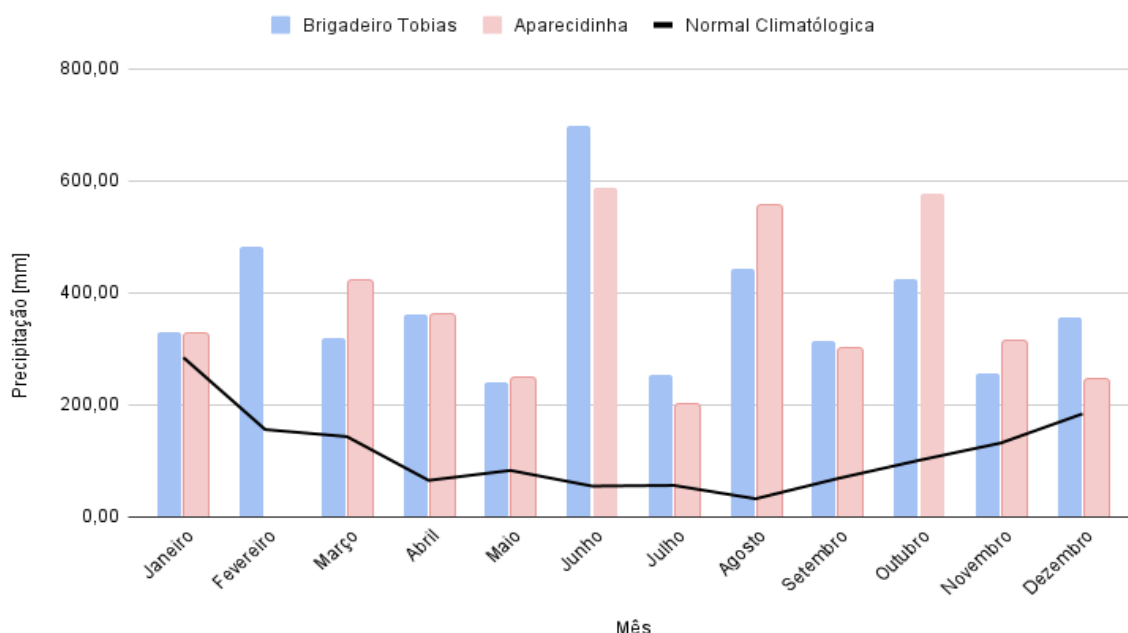
### 3.1 Clima

A região segundo a classificação de Köppen-Geiger, é de clima subtropical / tropical de altitude, com precipitação média anual de 1219 mm, marcado por períodos de verão quentes com temperatura média de 22° e inverno seco.

Em fevereiro de 2020 choveu uma sequência de quatro dias que, conforme a defesa civil, aumentaram os riscos de desastres, pois o solo estava saturado devido à chuva acumulada. Conforme o Instituto Geológico (2004), alguns valores de precipitação geraram alagamentos generalizados em Sorocaba, como as chuvas ocorridas em 4 de março de 1998, de 20,6 mm (34,4 mm acumulada em 72 horas).

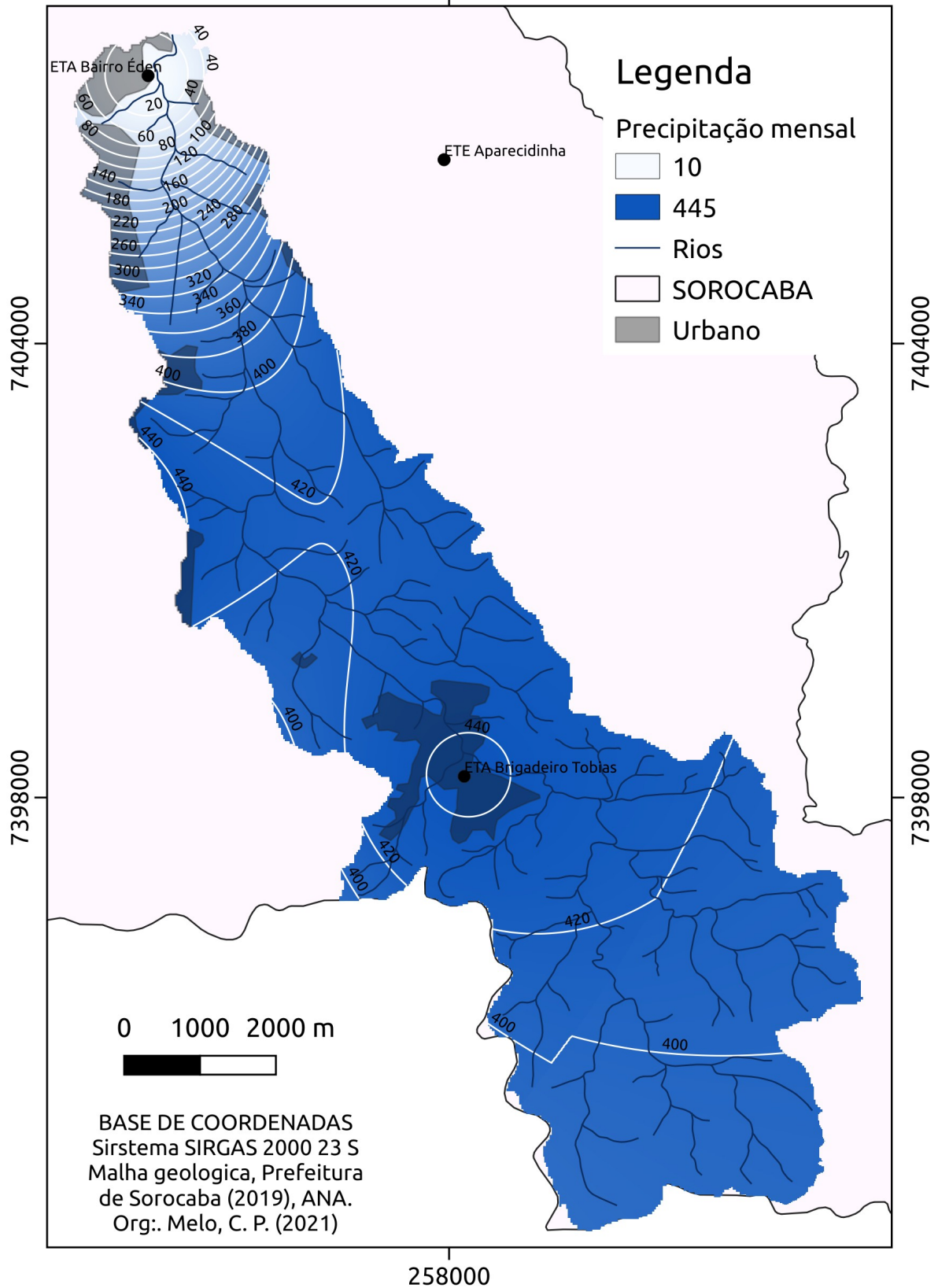
Como pode-se observar a partir dos dados pluviométricos para a cidade de Sorocaba, apresentada na Figura 6, constatamos que as chuvas para o ano de 2020 teve um aumento principalmente nos meses de Junho e Agosto.

Figura 6: Total de precipitação anual (2020) da estação da Vila Brigadeiro Tobias



Fonte: Elaborado pela autora a partir dos dados do CEMADEM, (2020).

Mapa 2: Precipitação  
258000



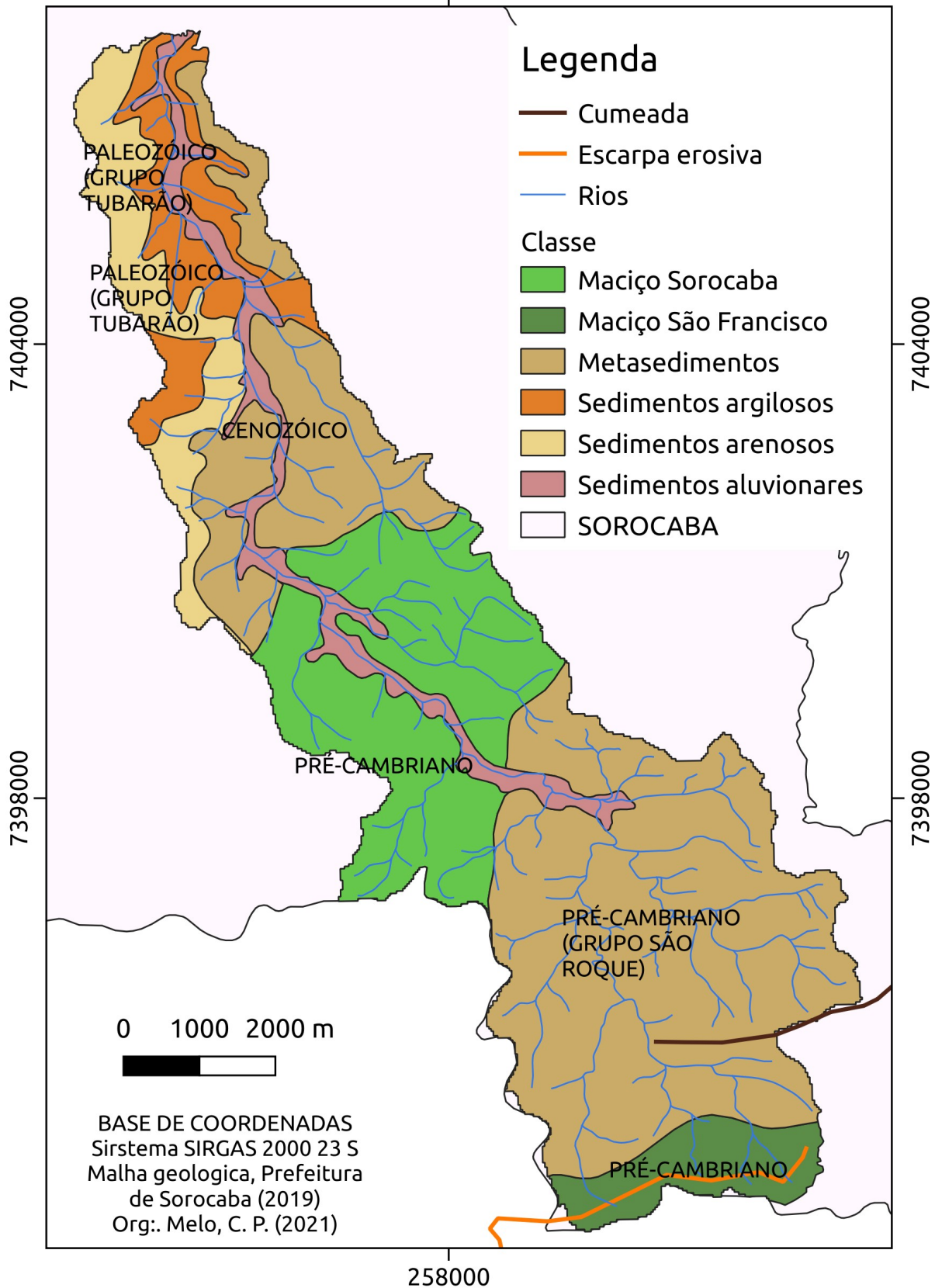
Fonte: Elaborado pela autora.

A variação da precipitação na bacia foi demonstrada (Mapa 2) através dos dados disponibilizados pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramentos e Alertas de Desastres Naturais), referentes ao ano de 2020, das estações referentes a Sorocaba, como a estação da Aparecidinha, à jusante da bacia, e a outra mais a montante de Brigadeiro Tobias. A maior acumulo de chuva encontra – se a sudeste de Sorocaba, caracterizada pela faixa litorânea e a borda do Planalto Atlântico, também abastece a represa Itupararanga inserida no município de Votorantim.

### 3.2 Geologia, geomorfologia e solos

Conforme o Instituto Geológico (2004) a área de estudo situa-se onde predominam as rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino do Planalto Atlântico, incluindo rochas metamórficas de baixo grau do Grupo São Roque (metarritmitos, filitos, metassiltitos, metarenitos e quartzitos) e granitos representados pelos maciços Sorocaba e São Francisco (Mapa 3). E afloram ainda depósitos (sedimentares) aluvionares associados às planícies aluviais dos Rios Pirajibú e Pirajibú-Mirim.

Mapa 3: Geológico  
258000



Fonte: Adaptado da Prefeitura de Sorocaba (2019).

Quanto ao relevo, a região encontra-se no limite entre dois compartimentos morfoestruturais e morfoesculturais (como vemos no Mapa 4): Cinturão Orogênico do Atlântico, unidade morfoescultural do Planalto Atlântico; Bacia Sedimentar do Paraná, unidade morfoescultural da Depressão Periférica Paulista. A unidade morfoestrutural Cinturão Orogênico do Atlântico, é marcada por litologias cristalinas pré-cambrianas, e a unidade morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, com predomínio de litologias sedimentares paleozóicas e mesozoicas.

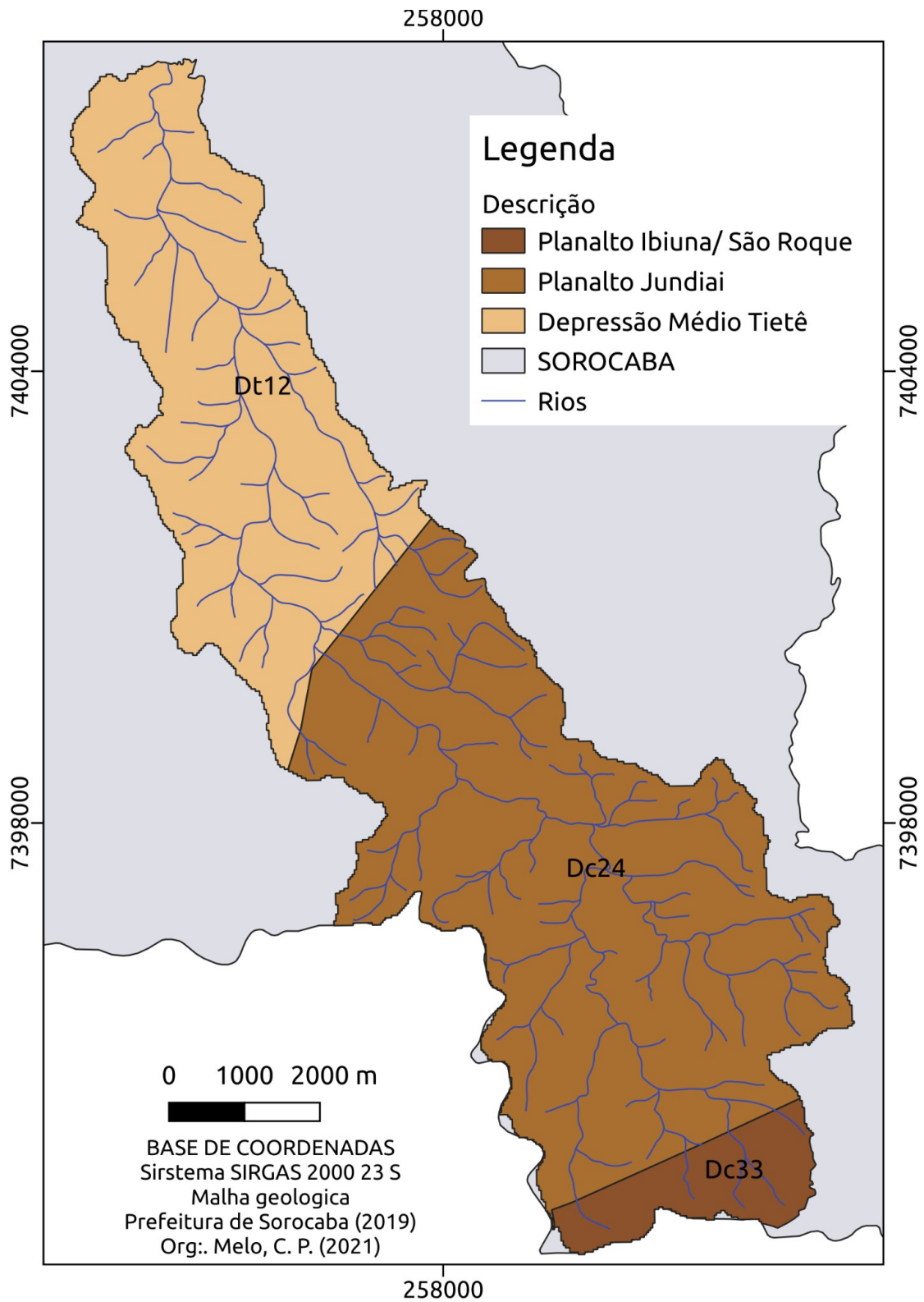
Essa configuração, associada à atuação dos agentes esculturais, resulta em tipos de relevo diversificados com interflúvios que em geral marcam patamares de 550-650 metros de altitude com topos levemente convexidades associados ao substrato sedimentar, níveis em torno de 700 – 800 metros com interflúvios dissecados e influenciados pelo material metamórfico do Grupo São Roque, compondo uma serra intermediária, e também níveis de 850 – 1200 m, nestes casos associados às serras de litologias quartzíticas e graníticas como a Serra do Japi e Serra de São Francisco respectivamente a sudeste, em direção ao litoral, diferentes serras regionais compõem a conhecida Serra de Paranapiacaba.

Na porção dominada pelo conjunto de serras cristalinas do município (porção SE), a Serra de São Francisco é a forma mais proeminente na paisagem. Trata-se de um batólito granítico de direção NE – SW, diminuindo gradativamente de altitude à medida que avança para sudoeste, até atingir o vale do Rio Pirapora (INSTITUTO GEOLÓGICO, 2004).

A porção da bacia, inserida na Depressão Periférica Paulista, as altitudes estão entre 500 e 700 m, e no Planalto Atlântico a sudeste, ultrapassa os 1.000 m. O relevo colinoso não está diretamente vinculado às litologias sedimentares, pois transgride seus limites e avança sobre rochas graníticas, metamórficas e migmatíticas do embasamento (IPT, 1981). A região inclui remanescentes de Mata Atlântica e de Cerrado e áreas de transição entre esses dois tipos de formação. Conforme o mapa pedológico de São Paulo, a área de estudo abrange cinco tipos de solos, a montante da bacia tem-se três tipos, um no centro e outro a jusante da bacia (Mapa 5).

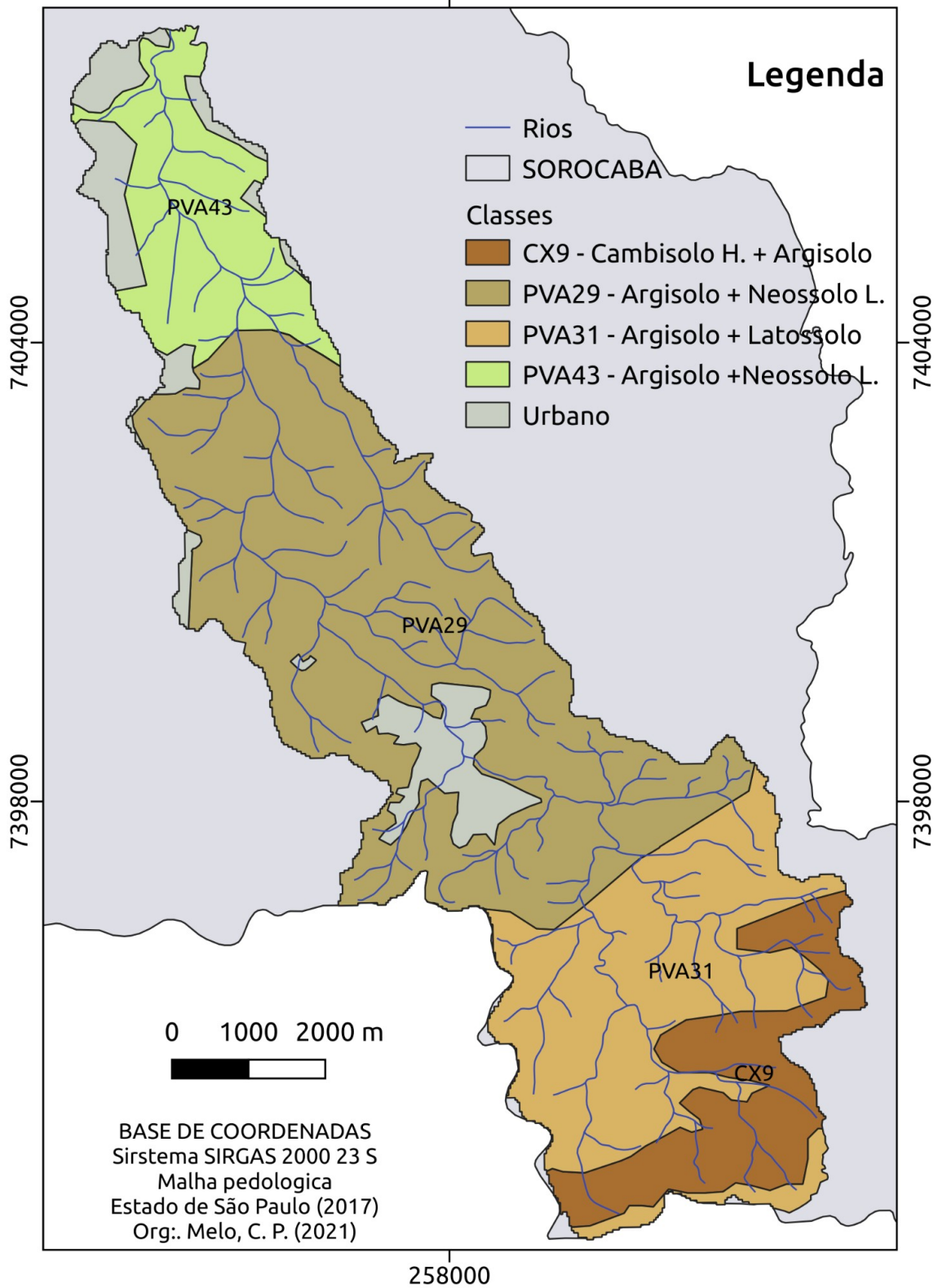


Mapa 4: Geomorfológico



Fonte: Adaptado da Prefeitura de Sorocaba (2019).

Mapa 5: Pedológico  
258000



Fonte: Adaptado de Rossi (2017)

Conforme o Mapa 5, às classes pedológicas encontradas na bacia é a classe CX9 cambissolo háplico + argissolo amarelo / vermelho - amarelo, PVA-29 argissolo vermelho - amarelo + neossolo litólico, PVA-31 argissolo vermelho - amarelo e vermelho + latossolo vermelho – amarelo / amarelo, PVA-43 argissolo vermelho - amarelo + neossolo litólico e o urbano onde se insere às zonas residenciais e industriais.

Os Cambissolos tem características variáveis, mas geralmente tem uma textura média ou mais fina, perfil menos profundos e pedregosidade ou cascalho na superfície ou no solo, tem a presença de fragmentos de rocha. Encontrado em locais com topografia mais íngreme ou baixa pluviosidade, geralmente na província geomorfológica do Planalto Atlântico.

Já os Argissolos tem características de textura média/argilosa e argilosa, encontrados usualmente nas rochas ígneas e metamórficas, os perfis por serem menos desenvolvidos têm pouca profundidade e com cascalho em superfície, principalmente nos relevos locais mais íngremes também do Planalto Atlântico.

Junto com os Argilosos têm-se presentes os Neossolos Litólicos distróficos fragmentários, devido às condições locais de relevo dissecado, são geralmente solos ruins para produção (agrícola e florestal) pela difícil exploração da água, é aproveitado quando se tem a manutenção da vegetação nativa e proteção das nascentes.

Também, associado ao PVA-31 Argissolo Vermelho - Amarelo e Vermelho têm-se os Latossolos que são de textura média, boa a moderada permeabilidade característicos da depressão periférica, os Latossolos Vermelho - Amarelo distróficos com textura argilosa, com elevada permeabilidade e baixa coesão são solos com maior suscetibilidade à erosão nos períodos de chuva e, quando em alta declividade, os processos de erosão ocorrem com maior constância (OLIVEIRA et al. 1999). Para obtenção da granulometria dos tipos de solo, já citados, foi criada a Tabela 3.

TABELA 3 - GRANULOMETRIA DOS SOLOS

Tipos de Solo	Areia %	Silte %	Argila %	Referências
Cambissolo	76	7	17	Silva <i>et al</i> 2013
Cambissolo Húmico distrófico latossólico	55	7	38	Dias <i>et al</i> 2003
Cambissolo Húmico distrófico léptico	58	11	29	Dias <i>et al</i> 2003
Argissolo	67	12	21	Junior <i>et al</i> 2020
Argissolo	41	19	39	Junior <i>et al</i> 2020
Argissolo Amarelo distrófico típico (A húmico)	63	10	23	Dias <i>et al</i> 2003
Cambissolo Háptico Tb distrófico típico	83	3	14	Dias <i>et al</i> 2003
Neossolo Quartzarênico órtico húmico	87	5	6	Dias <i>et al</i> 2003
Neossolo Quartzarênico órtico húmico	85	5	10	Dias <i>et al</i> 2003
Neossolo Quartzarênico órtico léptico	87	5	8	Dias <i>et al</i> 2003
Neossolo Litólico húmico típico	78	11	11	Dias <i>et al</i> 2003

Fonte: Elaborado pela autora.

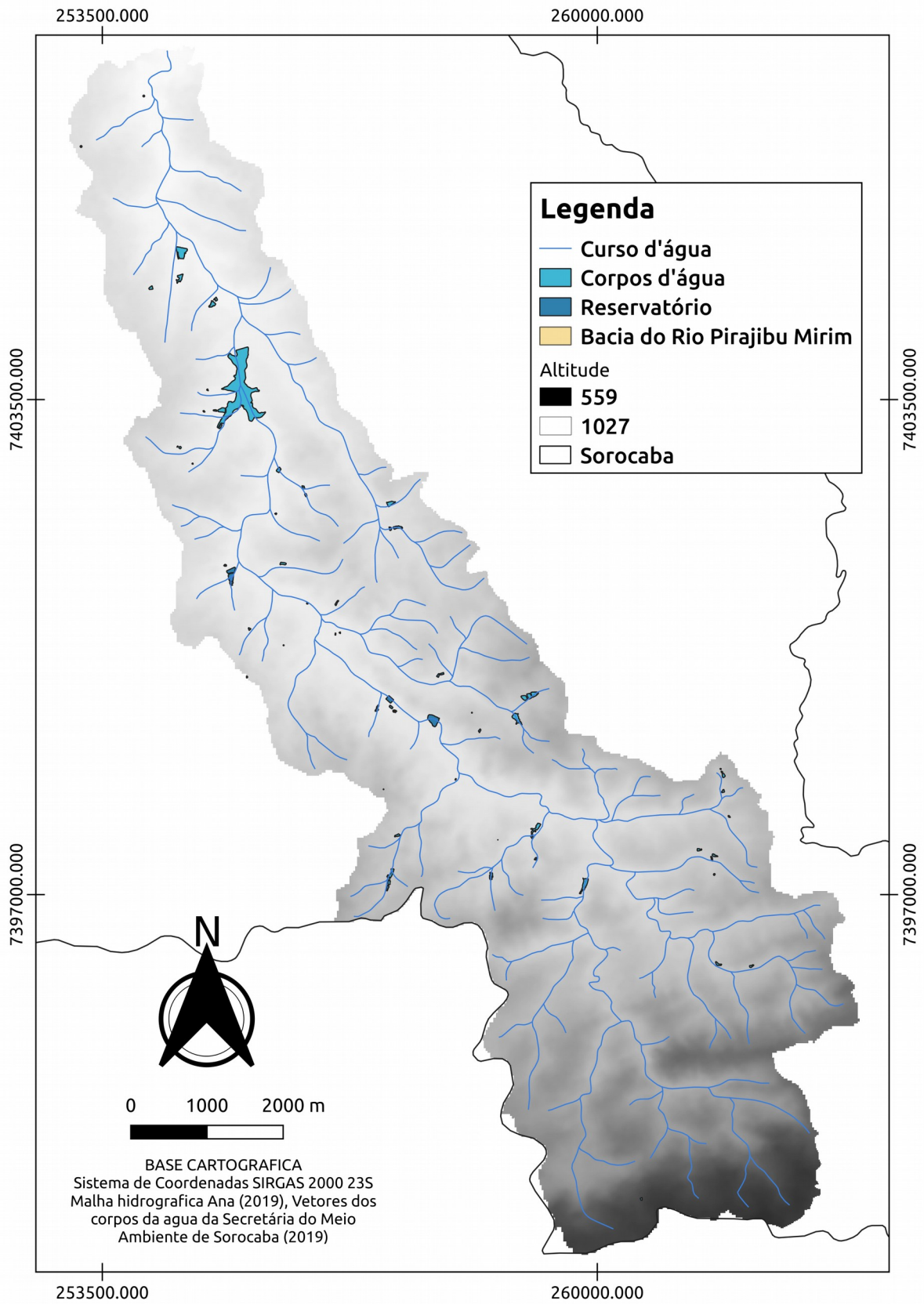
Para a área de estudo serão usados, como dados constantes, os dados de coesão e ângulo de atrito determinados por Segal (2011), com base nos ensaios de cisalhamento direto, sendo este feito de duas formas: com a umidade natural do solo e com o solo saturado. Obteve-se com o solo in natura o ângulo de atrito de 28,9 ° e a coesão de 19,4 KPa, para amostra submersa o ângulo de atrito foi de 25,1° e a coesão de 23 KPa (SEGA, 2011).

### 3.3 Águas superficiais e subterrâneas

O Rio Sorocaba é formado pelos Rios Sorocamirim, Sorocabuçu e Una, no município de Ibiúna e suas águas compõem a Represa de Itupararanga, importante reservatório regional utilizado no abastecimento público e produção de energia. Faz parte do Comitê de Bacias Hidrográficas dos Rios Sorocaba e Médio Tietê que abrange 34 municípios (área de 12.099 km<sup>2</sup>), dos quais dezesseis estão localizados na bacia do Médio Tietê superior e dezoito na bacia do rio Sorocaba.

A bacia hidrográfica do Rio Pirajibú-Mirim (Mapa 6), de quinta ordem, constituída por um total de 111 cursos de água, ocupa uma superfície de 56,125 Km<sup>2</sup> segundo a ANA – Agência Nacional de Águas (2015).

Mapa 6: *Corpos Hídricos*



Fonte: Modificado de ANA (2017).

A bacia trata e distribui 10% da água de Sorocaba (SAAE, 2020). Com isto, o Rio Pirajibú-Mirim é um rio importante para a população, sendo uma área estratégica de potencial nos recursos hídricos e na conexão de fragmentos florestais, conforme apontam Corrêa, Tonello e Franco (2016).

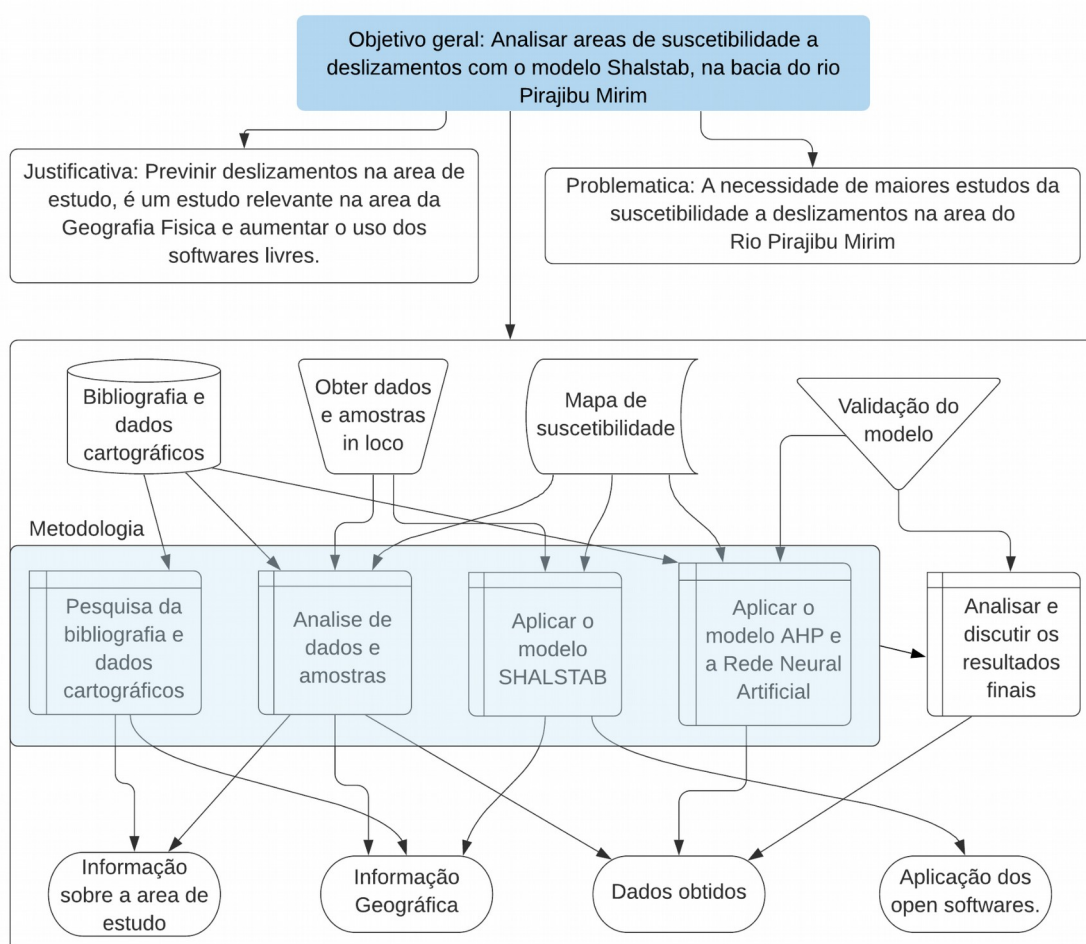
Corrêa, Tonello e Franco (2016) verificaram 11 minas d'água das 109 existentes de acordo com as cartas do IBGE (1996) na bacia do Rio Pirajibú-Mirim.

Situado em Sorocaba, encontra-se os Aquíferos Tubarão e também se tem a presença do Aquífero Pré-cambriano. O Aquífero Tubarão tem uma área de 40.000 km<sup>2</sup>, sua reserva ativa é da ordem de 10.000.000.000 m<sup>3</sup>/ano e a recarga de água subterrânea é da ordem de 240 mm/ano (DAEE, 1982). É do tipo descontínuo, tem horizontes e corpos d'água localizados, podendo ser semiconfinado e confinado, com transmissividade baixa, composto de arenito e siltito. Composto a área o Aquífero Pré-cambriano tipo também descontínuo, tendo porosidade e permeabilidade associados a fratura, composto de rochas gnaisse, granito, migmatito, xisto, metapelito, quartzito e meta- arenito. (IBGE, 2017). Sendo que as discontinuidades planares podem acontecer por fraturas, juntas ou falhas e pelas camadas de sedimentos ou discordâncias (PAULA E CAMPOS, 2016).

## 4. METODOLOGIA

Este capítulo será apresentado em quatro partes, na primeira serão detalhados os procedimentos quanto aos dados mensurados em campo, na segunda será exposto como foi aplicada a rede neural, a terceira expõe a aplicação do processo hierárquico analítico, chamado AHP, que auxiliará na indicação da susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas áreas urbanas, e então, o quarto passo, onde serão relatados os métodos para a obtenção e exposição dos dados cartográficos e de sensoriamento remoto. Para melhor entendimento, a metodologia é representada pelo fluxograma, na Figura 7.

Figura 7: Fluxograma dos métodos da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados necessários para a aplicação do SHALSTAB são:

- área de contribuição [m<sup>2</sup>]



- declividade [rad.]
- densidade aparente do solo [g/cm<sup>3</sup>]
- condutividade hidráulica [m/hr]
- espessura do solo[m]
- ângulo de fricção [graus]
- coesão (*bulk cohesion*)[MPa]

Os parâmetros como a condutividade hidráulica e espessura do solo, serão obtidos através de coleta de dados *in loco*, sendo que os valores de coesão e o ângulo de atrito interno serão obtidos através da modelagem por Redes Neurais Artificiais (RNA). Os dados dos atributos do solo e da condutividade hidráulica, deverão ser convertidos em dados matriciais para confecção dos mapas de suscetibilidade.

Os dados morfométricos do relevo, tais como a área de contribuição da bacia e a declividade da bacia foram obtidos a partir da elaboração do Modelo Digital de Elevação (DEM). O modelo depende da qualidade dos dados de entrada como as propriedades dos solos e também da resolução dos dados iniciais (SBROGLIA, REGINATTO, HIGASHI E GUIMARÃES 2018).

#### 4.1 Modelo SHALSTAB

O modelo SHALSTAB foi criado a partir dos trabalhos de Dietrich *et al.* (1995), Montgomery e Dietrich (1994) e Dietrich e Montgomery (1998). Este modelo tem sido usado por muitos pesquisadores, tais como (GUIMARÃES *et al.*, 2003), depois, (GUIMARÃES *et al.*, 2009; ZAIDAN e FERNANDES, 2009; LISTO e CARVALHO VIEIRA, 2012; MICHEL. KOBIYAMA e GOERL, 2014; VIEIRA; RAMOS, 2015; GODOY, 2015; LISTO, 2016; NUNES *et al.*, 2016; MELO, 2018), entre tantos outros.

O modelo gera a suscetibilidade a escorregamentos superficiais translacionais baseados na associação de um modelo hidrológico com o modelo de estabilidade do terreno. Este método possibilita mapear áreas suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa, com a determinação da pluviosidade necessária para desencadear estes eventos.

Utilizando parâmetros topográficos, geotécnicos e também meteorológicos, combinando os modelos hidrológico e o de estabilidade (talude infinito). Para encontrar o



ponto de instabilidade da encosta, onde ocorrem os eventos de movimentos de massa, o modelo estudado calcula de modo contínuo (*steady-state*) a chuva crítica, conforme Martins e Oka-Fiori *et al.* (2016). O modelo não prediz os lugares de escorregamento, entretanto, classifica as áreas com igual suscetibilidade a escorregamentos (REID *et al.*, 2007).

O modelo de talude infinito, não considera significativa a resistência ao cisalhamento local, mas tende a um espaço infinito, neste modelo para encontrar a resistência à ruptura (escorregamento) do solo, usa-se o critério da lei Mohr – Coulomb (LABUZ e ZANG, 2012).

O critério Mohr – Coulomb dá-se através da união da teoria dos círculos, feita por Mohr, nesta teoria denota não ter ruptura, enquanto o círculo que representa o estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura. Coulomb afirma que não se tem ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar o valor dado pela expressão  $(c + \mu \cdot \sigma)$  em que  $\sigma$  é a tensão normal do solo enquanto os outros dois parâmetros são propriedades do material. Através destes dois critérios tem-se o critério Mohr – Coulomb que é a união destas duas lógicas, ou seja, nesta teoria não se tem ruptura se o círculo de Mohr não fizer intersecção, com a linha de ruptura proposta por Coulomb.

Com esta teoria temos a resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) que se dá com a soma da coesão ( $c$ ), multiplicando a tangente do ângulo de atrito interno no plano de ruptura ( $\tan \phi$ ), com o resultado da força normal do solo ( $\sigma$ ) menos a pressão neutra ( $\mu$ ). Formando a expressão representada na Equação 1.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

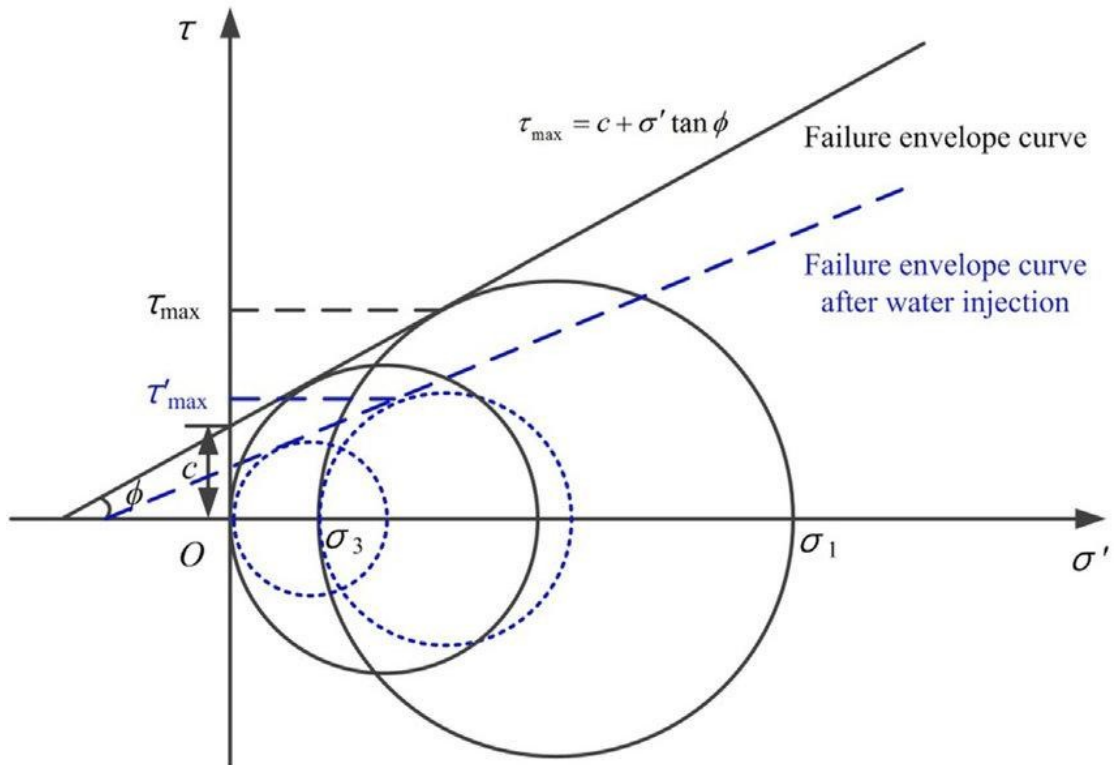
Entretanto, usa-se a poro pressão dos vazios (água, ar) no solo como exposto na Equação 2.

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \tan \phi \quad (2)$$

Notando que o comportamento da resistência muda em solos coesivos e não coesivos.

Sendo os solos não coesivos representados pelos solos granulares, que tem sua resistência principalmente pelo atrito das suas partículas. Já os solos coesivos (as argilas) são mais complexos, onde tem a relação com o tamanho das partículas e força eletroquímica de superfície. Notamos na Figura 8, a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) e sua variação em um local específico.

Figura 8: Mohr - Coulomb afetada pela umidade



Fonte: Yin F.et.al.,(2018). Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Mohr-Coulomb-criterion-affected-by-water-injection\\_fig4\\_322074492](https://www.researchgate.net/figure/Mohr-Coulomb-criterion-affected-by-water-injection_fig4_322074492)

A Figura 8 mostra por exemplo que a coesão e o ângulo de atrito interno diminuem com o aumento de umidade na seção transversal (YIN F. *et al.*, 2018). Ou seja, o solo saturado apresenta coesão muito baixa, onde em muitos casos o modelo é aplicado de maneira a não considerar a coesão e a espessura, também pela difícil mensuração em campo (GOMES *et al.* 2008). Entretanto, Sorbino, Sica e Cascini (2010) relatam que usando um tensiômetro, na parte alta do declive com 0.2 á 4 metros de profundidade a retenção de água varia muito, sem ter relação com a profundidade ou o regime de chuva.

Com o tempo, o modelo SHALSTAB foi evoluindo, mas por causa do parâmetro da coesão ser muito variável e de difícil mapeamento, precisando de coleta de amostras e análise laboratorial consumindo muito tempo poderia ter feito esta variação com imagens de alta resolução, entretanto teriam de ter maior conhecimento nesta área, com isto a coesão não foi considerada (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998)<sup>3</sup>.

Sem a coesão, as áreas de escorregamentos ficariam em maior evidência. Principalmente considerando o ângulo de fricção em um valor alto, mas dentro do aceitável.

<sup>3</sup>Teoria exposta no site <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/theory.html>

Logo, o modelo passou a considerar a espessura do solo e a coesão. Guimarães *et al.* (2017) considerou a coesão variável e os dados de precipitação, com isto mostrou que combinar os dados medidos e conectá-los contribui para melhor performance do mapeamento de suscetibilidade.

Ao desconsiderar a coesão, a Equação 2 fica como expresso na Equação 3. Sendo  $\rho_s$  e  $\rho_w$ , são a densidade aparente do solo e da água nesta ordem,  $g$  é a aceleração da gravidade.

$$\rho_s g z \cos\theta \sin\theta = \rho_s g z \cos^2\theta - \rho_w g h \cos^2\theta \tan\theta \quad (3)$$

Para mensurar a área de saturação e instabilidade do solo, a Equação 4 pode ser resolvida com a razão gerada pelo nível da água abaixo do plano de ruptura ( $h$ ), dividida pela sua profundidade ( $z$ ) igual à relação com o expresso na Equação 4.

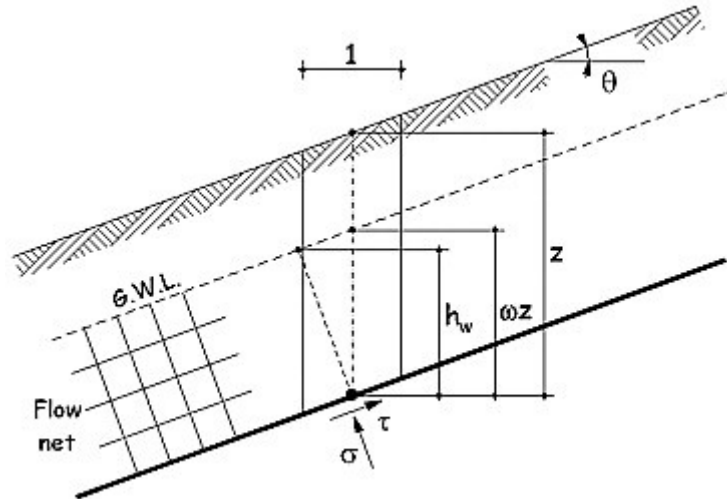
$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta \tan\theta}{\tan\phi} \right) \quad (4)$$

A Equação 4 mostra que o solo não precisa necessariamente estar saturado para a instabilidade. Dietrich *et al.* (2001) mencionam que:

Enquanto saturação é normalmente assumida na análise de uma cicatriz de escorregamento, teoricamente isso não é necessário. Nota-se que pode variar do zero (quando a declividade é tão inclinada quanto o ângulo de fricção) para  $\rho_w / \rho_s$  quando não tem declive ( $\tan\theta = 0$ ). Entretanto assumimos, que o plano de ruptura e a camada ( $z$ ) de fluxo interno são paralelos ao declive da superfície que no caso  $\frac{h}{z}$  pode somente ser menor ou igual a 1, e quando uma superfície tiver  $\frac{h}{z}$  maior que 1 é incondicionalmente estável – e chuva não pode causar o escorregamento (para futura discussão de terminologia do potencial de ruptura, veja Montgomery e Dietrich, 1994). Notasse que  $\frac{h}{z} \leq 1$  ocorre se  $\tan\theta \leq \tan\phi (1 - (\rho_s - \rho_w))$ . Observamos em campo que ambientes podem suportar a saturação sem causar um escorregamento. O valor de  $\frac{h}{z}$  pode localmente exceder 1.0 devido a gradientes de exfiltração, foi observado por Montgomery *et al.* (1997). Estes processos não são incluídos no modelo hidrológico Se a declividade do terreno igualar ou ser maior que o ângulo de fricção, então  $\frac{h}{z}$  é zero e o terreno é ‘incondicionalmente instável’ ou é um objeto ‘crônico’ de ruptura potencial; é comumente tido como terrenos com o leito emergindo na superfície.(DIETRICH ET AL. 2001).

Conforme a citação acima, o modelo assume que o nível da água é paralelo ao talude, como exposto na Figura 9.

Figura 9: Plano de resistência



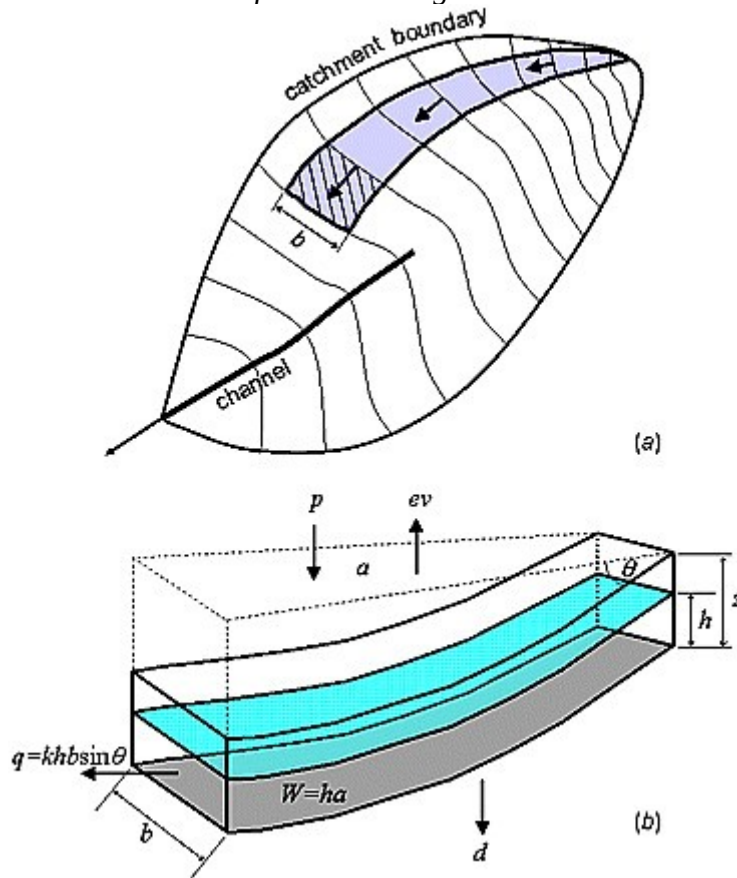
Fonte: Rosso, R., Rulli, M. C., e Vannucchi, G. (2006). Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005WR004369>.

Na Figura 9, o nível da água ( $h$ ) posiciona-se perpendicular à superfície ( $z$ ) e ao plano de ruptura, com o ângulo ( $\theta$ ) de declividade.

$$\frac{h}{Z} = \frac{q}{t} \times \frac{a}{(b \sin \theta)} \quad (5)$$

O Modelo Hidrológico exposto neste estudo é a partir de (O'LOUGHLIN, 1986), onde Dietrich e Montgomery (1998) usam como um componente na aplicação do SHALSTAB. Este é um modelo que é definido pela razão das espessuras do solo saturado (acima da camada impermeável, demonstrado na Figura 10) e do solo habitualmente instável, como exposto na Equação 5, que é a união da Lei de Darcy que calcula o fluxo em um solo permeável com o fluxo interno descrito na equação da transmissividade.

Figura 10: Esquema da área de drenagem (a) plano e os fluxos hidrológicos



Fonte: Rosso, R., Rulli, M. C., e Vannucchi, G. (2006). Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005WR004369>

A relação  $\frac{h}{z}$  indica a intensidade da chuva precipitada e a relação  $\frac{a}{b \sin \theta}$  indica a influência do relevo no escoamento superficial para Dietrich e Montgomery 1998).

A transmissividade do solo é obtida através da Equação 6 que relaciona a condutividade hidráulica do solo saturado  $k$  e a espessura  $Z$ , gerando a fórmula proposta por Hendriks (2010).

$$t = k \cdot z \quad (6)$$

Para a aquisição dos dados de permeabilidade dos solos, o permeâmetro de carga constante para solos saturados (tanto argiloso como arenoso) que foi utilizado nesta pesquisa,

segue o modelo do permeâmetro de Guelph, desenvolvido por Reynolds e Elrick (1983), e posteriormente aperfeiçoado no Canadá.

Para a interpretação dos resultados obtidos com o Permeâmetro de Carga Constante foi usado o método teórico desenvolvido por Reynolds e Elrick (1985), baseado em Richards (1931), levando-se em consideração a área do reservatório e o valor constante mensurado, determinando-se a vazão (Q) pela área do reservatório do Permeâmetro utilizado (A) e a razão da vazão constante obtida durante os ensaios (R).

$$Q = R \cdot A \quad (7)$$

Para determinar o parâmetro que corresponde a infiltração dos solos, é usado o método de carga hidráulica proposto por (ELRICK; REYNOLDS; TAN, 1989). O método consiste em aplicar uma altura de carga hidráulica constante (H) no orifício do solo e quando o regime permanente é atingido, determina-se a condutividade hidráulica saturada (Ks), sendo que o  $\alpha$  é os tipos de solo, de acordo com a textura e estrutura do solo, na Tabela 4 é exposto mostras possíveis por Reynolds e Elrick (2002) por (Equação 8):

$$K_s = \frac{C \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot 2 \cdot \pi \cdot \alpha^2 \cdot C + \frac{2 \pi \cdot H}{\alpha}} \quad (8)$$

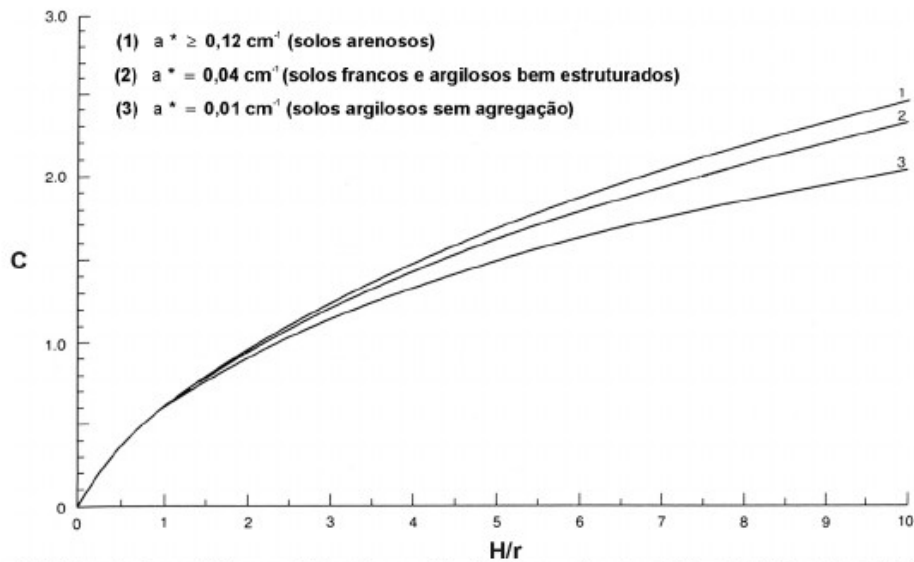
TABELA 4 - TIPOS DE SOLOS

$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	Tipos de Solos
1	Argilas compactas (aterros, <i>liners</i> , sedimentos lacustres e marinhos)
4	Solos não estruturados de textura fina
12	Solos mais estruturados de argila a solos não estruturados como areias finas
36	Areia grossa e pode incluir solos muito estruturados com macro poro e fissuras

Fonte: Elrick; Reynolds; Tan, 1989.

Já o fator de forma adimensional (C), que depende da relação H/a pode ser encontrado através do gráfico apresentado na Figura 11.

Figura 11: Gráfico da Fator de Forma C1, C2 E C3



Fonte: Marques Espinha *et al.* (2009).

Como também através da Equação 9 se  $\alpha \geq 0,12 \text{ cm}^{-1}$ , Equação 10 se  $\alpha = 0,04 \text{ cm}^{-1}$  e Equação 11 se  $\alpha = 0,01 \text{ cm}^{-1}$ .

$$C1 = \frac{H}{2,074 \alpha + 0,093 H}^{0,754} \quad (9)$$

$$C2 = \frac{H}{1,992 \alpha + 0,091 H}^{0,683} \quad (10)$$

$$C3 = \frac{H}{2,102 \alpha + 0,118 H}^{0,655} \quad (11)$$

Os modelos combinados e apresentados sob a forma da razão  $\frac{q}{t}$  sendo que inicialmente não se considerava a coesão igual a zero, entretanto Montgomery *et al.* (1998) considera a coesão, da forma disposta a seguir:

Sem coesão:

$$\frac{q}{t} = \left( \frac{b \sin \alpha \sin \beta}{\alpha} \right) \cdot \left( \frac{y}{yw} \right) \left[ 1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \right] \quad (12)$$

Com coesão:

$$\frac{q}{t} = \left( \frac{b \sin \alpha \sin \beta}{\alpha} \right) \cdot \left[ \frac{c}{ywgZ \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{y}{yw} \left( 1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (13)$$

Utilizando parâmetros e os modelos hidrológico e o de talude infinito temos a equação exposta abaixo:

$$\frac{q}{t} = \left( \frac{\rho s}{\rho w} \right) \cdot \left[ 1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \right] \cdot \frac{b}{a} \sin \theta \quad (14)$$

Estas fórmulas foram usadas no trabalho de Dietrich e Montgomery (1998).

A aplicação do SHALSTAB resulta em um mapa de suscetibilidade com sete classes de estabilidades disposto na Tabela 5. Sendo que a classificação dos valores de  $\frac{q}{t}$ , é dado em logaritmo, pois é aplicado em função de t ser um número bem maior que q, gerando assim baixos valores para esta razão.



TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DO SHALSTAB

Nº	Identificação de Classes
1	Incondicionalmente instável
2	$\log \frac{q}{t} - 3,1$
3	$-3,1 < \log \frac{q}{t} - 2,8$
4	$-2,8 < \log \frac{q}{t} - 3,1$
5	$-2,5 < \log \frac{q}{t} - 2,2$
6	$\log \frac{q}{t} > - 2,2$
7	Incondicionalmente estável

Fonte: Dietrich, 2001.

A hierarquização das áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos, indica que, quanto maior for valor absoluto da razão hidrológica  $\frac{q}{t}$ , maior será a instabilidade do local (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998; BAUMANN, 2018).

A classificação das classes suscetíveis será feita conforme Melo (2018). Analisando a relação entre  $\frac{q}{t}$ , igualada a zero, nota-se que a elevada declividade da encosta se sobressai aos padrões de resistência do solo, como a coesão e o ângulo de atrito, então é estabelecida a classe incondicionalmente instável. No entanto, tem-se a circunstância em que  $\frac{q}{t}$  mostra a saturação total do solo, no contexto em que a resistência será sempre maior ou igual à declividade. Essa situação representa a determinação da classe incondicionalmente estável, embora esteja em um lugar de baixa declividade, tem-se o solo saturado. A chuva (q) para uma comparação par a par será analisada de acordo com a área de estudo que se enquadra de acordo com Monteiro (1976). As categorias taxonômicas da organização e articulações geográficas do clima se enquadram em uma estratégica de abordagem que irá propor registros

móveis (episódios) já que é um modelo (*steady - state*) com uma técnica de análise espacial como o modelo SHALSTAB.

O mapa de suscetibilidade e sua classificação foi elaborado através do SAGA GIS. O *software* foi criado por um pequeno grupo de pesquisadores (J. Böhner, O. Conrad, R. Köthe and A. Ringeler) no Departamento de Geografia Física de Goettingen na Alemanha, no ano de 2001. Também foi feita uma sucinta relação com a ferramenta SHALSTAB da SAGA GIS e com a ferramenta *r.shalstab* criada por Andrea Filipello da Universidade de Turim e Daniele Strigaro da Universidade de Milão em 2017.

O modelo SHALSTAB vem sendo usado em várias aplicações como na análise do risco de fluxo de detritos por Aronica *et al.* (2012), na susceptibilidade de escorregamentos junto a uma análise das áreas de risco por Listo e Carvalho Vieira (2012), na união de métodos e com a integração de uma simulação temporal, como fez Gorservi *et al.* (2006), dentre muitos outros, pois este método está sendo aplicado desde 2002 e continua na atualidade.

Sorbino, Sica e Cascini (2010) dizem que o SHALSTAB superestimou as áreas de escorregamentos, por ser um modelo *steady-state* hidrológico, mas pode ser bom em uma análise preliminar. No Brasil, vemos que o modelo não superestimou as áreas de escorregamentos, podendo ser usado em indicações de áreas de monitoramento (LISTO, RAMOS e VIEIRA, 2016).

#### 4.2 Trabalho de campo

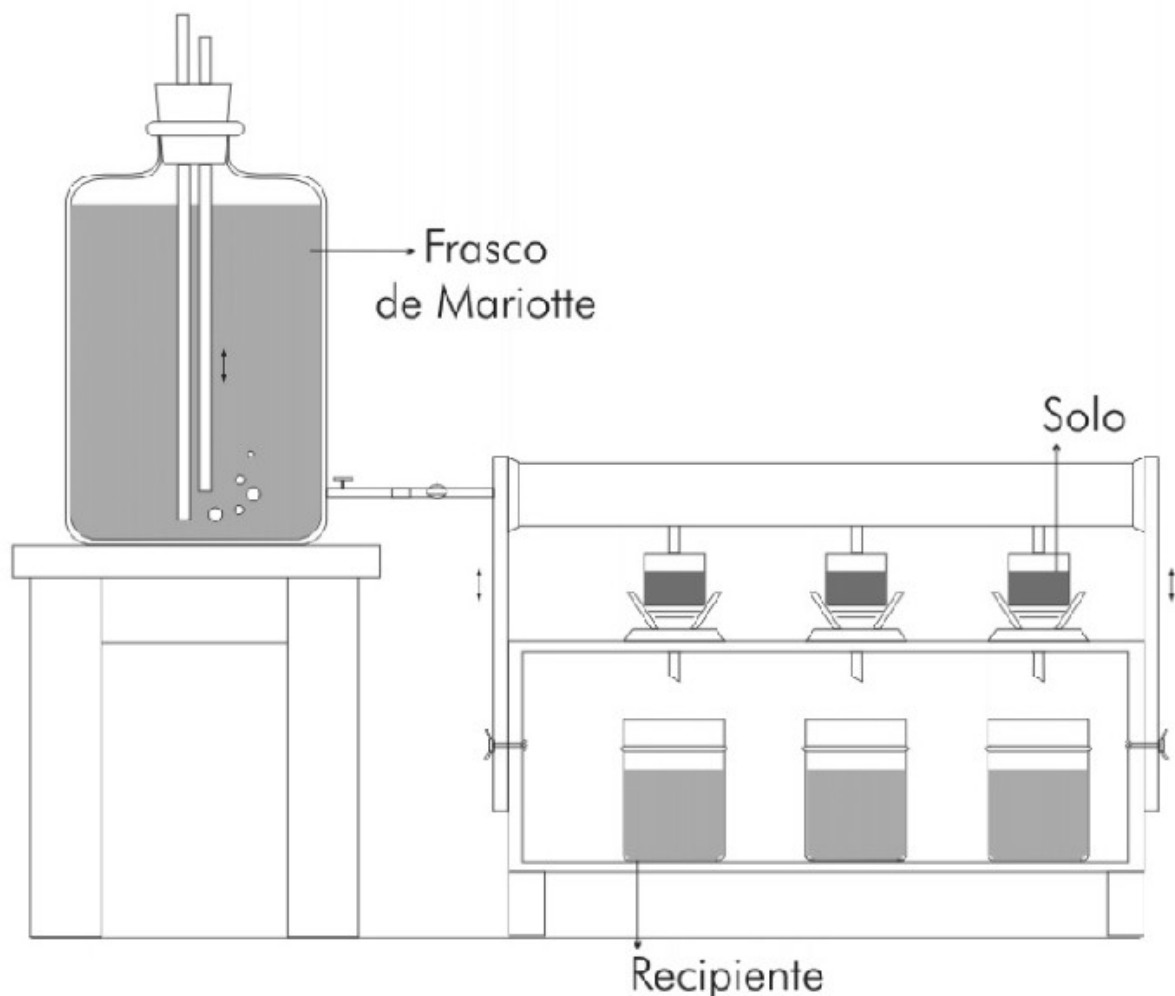
Os passos que antecederam o trabalho de campo foram a escolha e distribuição dos pontos de coleta e mensuração de dados *in loco*, a confecção do permeâmetro de carga constante, sua calibração e testes de funcionamento. A mensuração da condutividade hidráulica foi dividida em 16 classes de tipos de solo, a partir de Iwahashi e Pike (2007), associado à pedologia de Sorocaba. Com os dados de condutividade hidráulica calcula-se a transmissividade, como já visto no item 2.4 na Equação 6. Para a mensuração da condutividade hidráulica do solo, foi empregado o permeâmetro de carga constante, pois, as áreas saturadas não apresentam variação do nível da água, portanto, mantém - se a carga

constante na mensuração (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP., 2012).

Para a confecção do permeâmetro de carga constante (Figura 14), foram usados tubos e conectores de PVC e válvulas, tendo como princípio o Frasco de Mariotte, junto aos princípios do Permeâmetro de Guelph pelo SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. (2012).

O Frasco de Mariotte (Figura 12) é um recipiente cilíndrico atravessado por um tubo aberto nas duas extremidades, de um lado fica sob a pressão atmosférica e do outro, fica submerso na água, sendo que neste recipiente há somente uma abertura na parte inferior para a saída de água, que sai com fluxo constante até o final do tubo, então deixa de ser constante. Se aplicássemos a equação de Bernoulli nos pontos A e B, obteríamos a velocidade constante.

Figura 12: Permeâmetro de carga constante feito com o Frasco de Mariotte



Fonte: Marques *et al.* (2008)

A Figura 12 apresenta um permeâmetro de carga constante, feito com o princípio do Frasco de Marriotte onde mostrou ser melhor que o permeâmetro decrescente para a área por Marques *et al.* (2008). O permeâmetro de Guelph funciona do mesmo princípio, mas o fluxo depende de uma medida inicial e das propriedades do solo.

O permeâmetro confeccionado (Figura 14) para realizar esta pesquisa teve os princípios do permeâmetro de Guelph, porém com um funcionamento mais simples. Foi necessária a confecção deste instrumento pois o permeâmetro de Guelph é um instrumento de difícil obtenção devido ao valor monetário e à disponibilidade. Foram realizados vários testes a fim de se observar o comportamento do funcionamento do permeâmetro e a consistência dos dados obtidos. Os resultados foram muito satisfatórios e permitiu-se a utilização do instrumento na pesquisa.

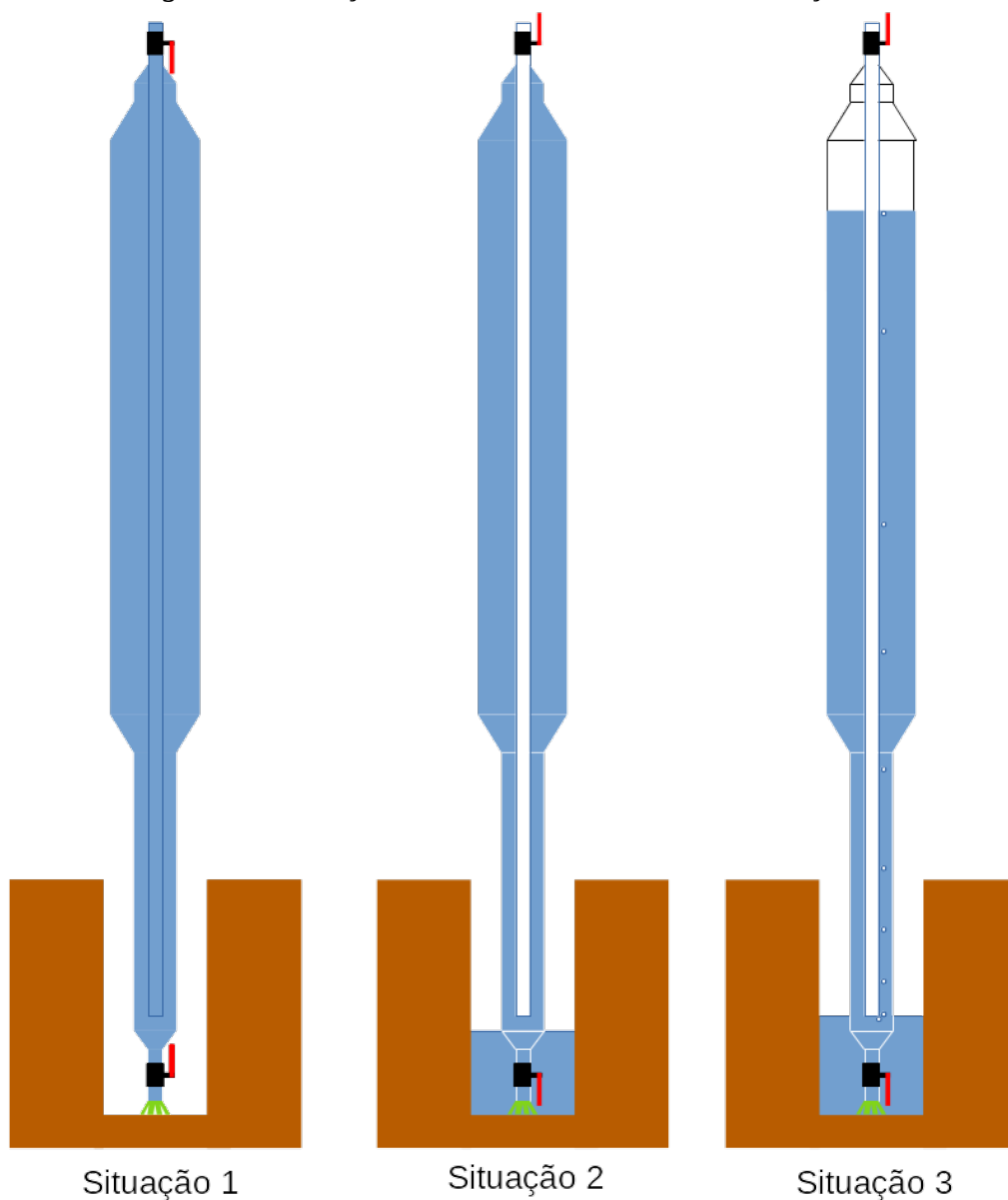
*Figura 13: Permeâmetro tipo Guelph*



Fonte: Elaborado pela autora.

A mensuração com o equipamento se dá inicialmente com permeâmetro inteiro preenchido com água, situação 1 como demonstrado na Figura 15, e as válvulas se encontram fechadas. Na situação 2, as válvulas são abertas e a água que estava no tubo central escoou completamente. Neste ponto o permeâmetro ainda não é de carga constante. Tentou-se que este período transiente fosse minimizado o máximo possível na construção do equipamento.

*Figura 14: Situação de desenvolvimento da mensuração*

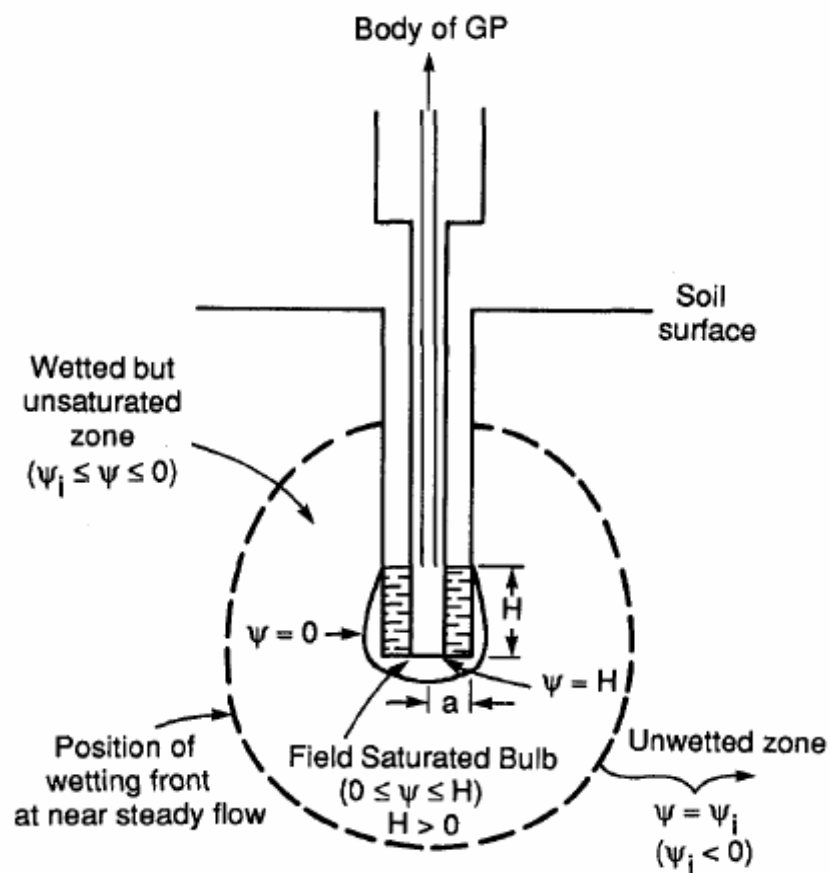


Fonte: Elaborado pela autora.

Na situação 3, a água começa a escoar do tubo externo e, como o tubo está completamente fechado, o ar começa a entrar pelo tubo central e preencher o tubo externo, à medida que o solo absorve a água. Com isso, o volume de água absorvida é o mesmo volume de ar que entra no tubo externo. Desta forma, medindo-se a variação da altura na coluna de água do tubo externo, pode-se medir a vazão de água a carga constante.

No solo, o diâmetro do orifício aberto com trado foi de aproximadamente 20 cm de diâmetro, pois como mostrado no esquema de saturação da Figura 13, foi definido a partir da altura de carga hidráulica constante, do valor de saturação do bulbo e da saída de água a ser centrada o valor, ficara constante e então será calculado a vazão e a condutividade hidráulica.

Figura 15: O bulbo de saturação



Fonte: Elrick, Reynolds e Tan (1989).

Para a mensuração da condutividade hidráulica foi utilizado o permeâmetro tipo Guelph elaborado, cujas mensurações nos solos ocorreram entre 30 e 35 cm de profundidade (Figura 15). Foram calculadas as vazões a partir da área do reservatório que é igual a 0,059 m<sup>3</sup>, considerando aproximadamente 0,007 m<sup>3</sup> de água que não é constante, entretanto tem a função de saturação (água do tubo interior), para estabilização do bulbo de saturação. O processo de estabilização do bulbo de tensões exposto na Figura 15, depende da textura e tipo do solo. Por exemplo, um solo mais fino de textura mais argilosa, a água leva maior tempo de infiltração vertical, ao passo que em um solo mais arenoso a infiltração vertical é maior, pois leva menos tempo de infiltração.

A partir da obtenção dos dados de  $k_s$  mensurados, calcula-se a transmissividade hidráulica de cada ponto de coleta entre 50 cm e 80 cm de profundidade, notando que cada teste foi feito em uma profundidade de aproximadamente 35 cm.

#### 4.3 Rede neural artificial para obtenção dos parâmetros do solo

Geralmente para obtenção dos parâmetros de ângulo de atrito interno e coesão usa-se o ensaio de cisalhamento direto, através da norma ASTM D3080, que consiste na aplicação de uma tensão de cisalhamento horizontal crescente, juntamente com a tensão normal fixa, que gera a ruptura ao longo da superfície conhecida. Com isto obtém-se a tensão normal à superfície do escorregamento, o valor da tensão cisalhante para a ruptura da amostra e gerando a curva tensão - deformação. A variação volumétrica também pode ser indicada com o deslocamento vertical. Neste ensaio quanto maior os valores de resistência ao cisalhamento maior tende a ser a força cisalhante. Pode-se ter a amostra com umidade natural e submersa. Segal (2011) mensurou o solo de Sorocaba, com amostras de solo compactado, com 26 golpes, talhado, preenchendo o corpo de prova e colocado na caixa de cisalhamento. Realizou alguns testes, variando as tensões. Com isso obteve na amostra submersa um ângulo de atrito de 25,1° e coesão de 23,0 KPa e, para a amostra com a umidade natural, o ângulo de atrito foi de 28,9 ° e a coesão de 19,4 KPa.

Entretanto, Iyeki *et al.* (2016) menciona que o uso de laboratório é algo difícil e que leva tempo e recurso financeiro. Infelizmente estes equipamentos não estão disponíveis com

facilidade. Já a RNA utiliza um método de aprendizado com os dados de entrada e saída e tem alta capacidade de previsão, sendo usado em várias áreas como na geotecnia para encontrar propriedades do solo como o ângulo interno de fricção e a coesão como Braga (2014), Goktepe *et al.* (2008), Iyeke *et al.* (2016), Al-Hamed *et al.* (2014) e Lal B. e Kiran S. (2016).

As redes neurais artificiais são uma referência à neurobiologia, tentando imitar sinais dos neurônios (CHOLLET e ALLAIRE, 2017). Tendo esta lógica, cada neurônio é ligado por uma conexão, e toda conexão tem um parâmetro de peso associado. Cada neurônio recebe estímulos do neurônio conectado com ele, o que produz uma informação gerando uma resposta (*output*), os neurônios que recebem informações de fora da rede são os neurônios de entrada (*inputs*), já o neurônio que recebe estímulos de um outro neurônio que recebe o estímulo de um neurônio de saída, este será um neurônio escondido (*hidden layers*), e com isso se pode criar muitos tipos de redes e processos como a mais usual Perceptron Multiplicados (WANG e YUAN, 2005).

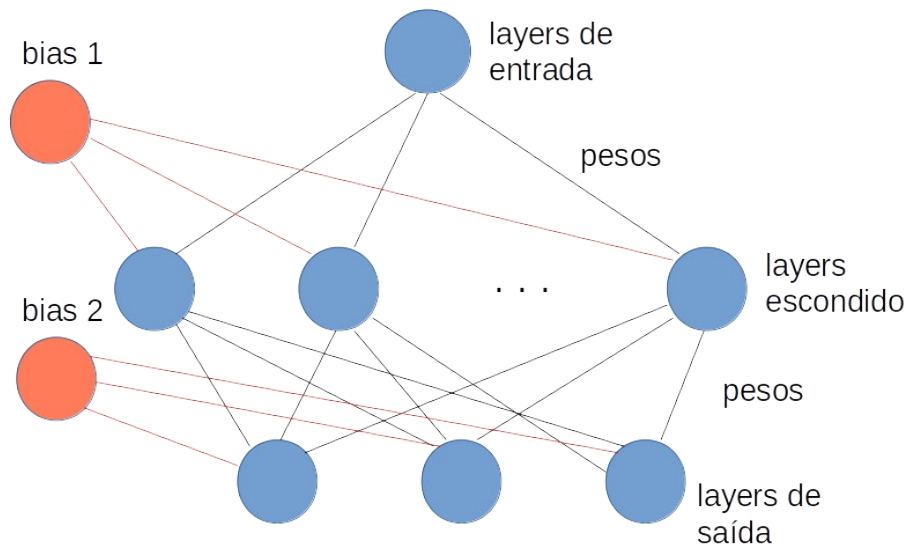
Cada neurônio de entrada, recebem pesos, estes pesos são somados e passados por uma função de ativação, com isto temos os dados de saída. Esta função de ativação não linear, que serve como um limite, se alcançado ou não, podendo-se ter a saída ou não (WOLLSEIFEN, 2019). Se a soma dos pesos é zero, e todas as saídas dos neurônios escondidos for zero, criasse as bias ou seja um neurônio igual á 1, e o seu parâmetro peso é chamado como bias ( $\gamma$ ) este é acrescentado à soma dos pesos como demonstrado na fórmula 15 (WANG e YUAN, 2005).

$$\gamma = \sum \text{Pesos} + z \quad (15)$$

As redes são tidas como na Figura 16, compostas por *layers*, que são compostos por um ou muitos neurônios ou nós. O termo *deep learning* vem dos *layers* escondidos, tanto mais *layers* escondidos mais “*deep*” (fundo), que não está relacionado com um entendimento maior ou algo do tipo (CHOLLET e ALLAIRE, 2017).



Figura 16: RNA



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a rede estruturada, iniciamos seu treinamento colocando os pesos, é indicado que estes sejam randômicos, será usado neste trabalho o algoritmo de retro programação do erro (*backpropagation*) criado por Rumelhart, Hinton e Williams (1986) usado por Iyeye *et al.* (2016) e vários outros, onde os treinamentos se dão com entrada e saída de dados. Tem vários métodos de cálculo de erro, como a soma do erro quadrático, que no geral calcula-se o desvio das saídas preditas com os dados de entrada, ou seja, quando o desvio é muito grande o modelo está mal representado e seus pesos devem ser reajustados (ZHANG, 2016).

Para o treinamento da rede será usada a função NN do *package neuralnet* juntamente com às contribuições de Intrator e Intrator (2001) que calcula os pesos generalizados e o algoritmo que gera a retro programação do erro *+rprop* sendo a partir da função NN que é flexível e poderosa como diz e explica Zhang (2016).

Para aplicar a RNA foi usado o software RStudio. Inicialmente foram criadas duas tabelas com entradas e saídas de dados. Os dados tratados e limpos, ou seja, sem dados nulos ou irregulares, foram utilizados no treinamento da rede, usando o *package neuronet*, onde se tem a função NN, observando a melhor possibilidade de rede, notando que com mais *layers* escondidos tem se o risco do *overfitting*, ou melhor, quando a rede gera bons resultados, mas

não consegue prever dados futuros. Na função NN, será usada a soma do erro quadrático.

Para uma comparação entre os dados especializados e os dados constantes, primeiramente teremos o Caso A usando a RNA como dados dispersos na superfícies e então um Caso B para os dados constantes usando os dados de Segal (2011), os dados obtidos in loco de condutividade máxima de  $1,2 \times 10^{-5}$  m/s e a mínima de  $5,4 \times 10^{-6}$  m/s e dados padrão de densidade aparente.

#### 4.4 Análise pelo Processo Hierárquico Analítico (AHP)

Nesta próxima etapa, de posse dos fatores condicionantes dos escorregamentos, considerados neste trabalho, foi aplicada a técnica estatística AHP de comparação par a par entre os fatores, ponderados de acordo com sua importância relativa. Neste procedimento, os valores de importância para estes fatores foram obtidos a partir da matriz de comparação par a par pela técnica AHP proposta por Saaty (1980).

Por esta técnica, foi calculado um conjunto de critérios (pesos) relativos a cada um dos fatores de escorregamento e, depois de ter os dados normalizados, encontram-se os pesos de cada fator e a razão de consistência (RC) que precisa ser menor que 0,1. Para isto gera-se o índice de consistência obtendo a razão da consistência e, com isto, saber se os critérios são consistentes ou não, necessitando recalcular o RC se for maior que 0,1. Com os pesos consistentes, tem-se a hierarquia dos critérios, podendo com isto gerar mapas para melhor visualização dos resultados.

Os fatores condicionantes levados em consideração para esta aplicação serão tipo de solo, o uso do solo, TWI (*Topographic Wetness Index*) e o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Os tipos de solo conforme já exposto no item 2.2 foi levado em consideração em relação às áreas de maior erosão e probabilidade de instabilidade. O uso do solo será referente às zonas de uso do solo, dando os pesos mais altos as áreas mais urbanas como as zonas residenciais, especificados pela prefeitura de Sorocaba as zonas:

ZR1, ZR2 e ZR3 - Zonas Residenciais

ZI - Zona Industrial

ZAE - Zonas de Atividades Especiais

ZPI - Zona Predominantemente Institucional

ZCH - Zonas de Chácara

ZCA - Zonas de Conservação Ambiental

Z RURAL - Zona Rural

O TWI é um modelo com vantagem de se ter uma simples aplicação, tendo como base a aproximação da variação hidrológica da bacia e também da variação espacial da evapotranspiração, uma resposta às limitações econômicas de mensuração *in loco* (BEVEN E KIRKBY, 1979).

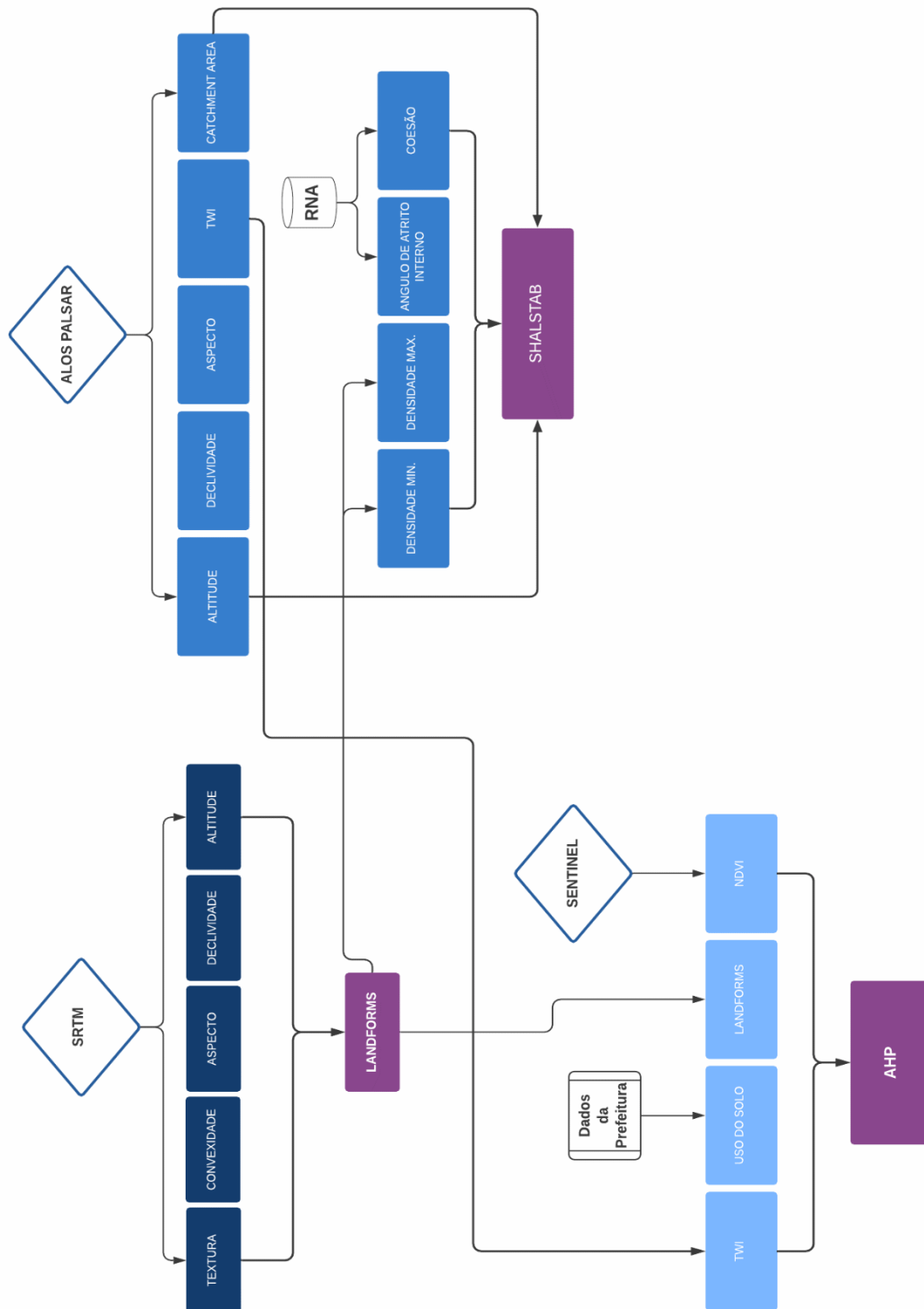
Para analisar os pontos onde o solo apresenta cobertura vegetal, desprotegido (áreas de erosão, por exemplo) e áreas urbanas, o NDVI vem sendo uma ferramenta valiosa e amplamente usada, como menciona May *et al.* (2020). Ferramenta esta que está diretamente ligada aos tipos e distribuição da cobertura vegetal do solo (CRUZ FLORES *ET AL.* 2020) e com isso, associado aos outros parâmetros, Huang *et al.* (2006) utiliza para prever as áreas de escorregamentos. Sendo posta as áreas sem cobertura vegetal os valores mais altos, por serem locais já modificados.

Uma vez os pesos normalizados, seguiu-se para encontrar a razão de consistência, onde os dados poderiam ser classificados como consistentes ou não.

#### 4.5 Cartografia e sensoriamento remoto

Para compreender o fluxo cartográfico segue a Figura 17.

Figura 17: Fluxograma de mapas



Fonte: Elaborado pela autora.

Como vemos no fluxograma (Figura 17) os Modelos Digitais de Elevação (DEM) usados foram elaborados a partir das imagens Alos Palsar de 12 metros e meio de resolução, e SRTM de 30 metros de resolução sendo este com os vazios preenchidos. Pois, com as duas resoluções pode se ter melhores resultados no modelo hidrológico, por exemplo, e se aplicar os valores dos solos encontrados em campo. Sbroglia, Reginatto, Higashi e Guimarães (2018) usa dois tipos de resolução (1:10,000 e 1:50,000) notando que em menor resolução (1:50,000) fica menos evidente as áreas de relevo e com isto aumenta as áreas de estabilidade, podendo ser útil em uma análise preliminar. Entretanto, com maior resolução (1:10,000) gerou-se a maior qualidade nos resultados, tendo as cicatrizes identificadas em 60%. Entretanto, se for feito um DTM através de imagens LIDAR, tem-se uma resolução muito satisfatória com erro de 15 cm de altimetria, mas apresentam algumas limitações como no modelo hidrológico e de suscetibilidade a escorregamentos, como apresentado por Martins e Oka-Fiori *et al.* (2016). O *grid* de 2 e 4 m não apresenta melhoria vantajosa ao se comparar com os de 10 m. Neste caso, tem-se esta melhoria acentuada ao se comparar com o *grid* de 30 e 90 metros (MELO E KOBIYAMA, 2018). Entretanto, não tem resolução perfeita que possa mostrar todas as características de um declive (MICHEL, KOBIYAMA, GOERL, 2014).

Foram usados dados do IBGE (2017, 2018 e 2019) como malhas de país, estado, municípios, e *shapefile* geológicos, geomorfológicos, solos, cursos d'água, entre vários outros da Secretaria do Meio Ambiente (SEMA), junto a Prefeitura de Sorocaba. Esta mesma instituição também disponibilizou orto imagens feitas em 2018 de toda a bacia do Rio Pirajibu - Mirim.

A bacia foi delimitada pela ferramenta '*Channel network and drainage basins*' oferecida pelo SAGA GIS, através do DEM Alos Palsar e também comparado com o arquivo de contorno da bacia (formato *shapefile*) disponibilizado pela SEMA. A análise comparativa final considerou as áreas de drenagem da bacia dadas pelo SAGA GIS de encontro com o contorno da bacia Rio Pirajibú fornecido pela SEMA, resultando em um recorte mais fiel aos canais de escoamento desta bacia.

Após a conclusão do contorno da bacia, foram gerados os mapas base como de localização da área de estudo, altitude, geológico, geomorfológico e os referentes aos

recursos hídricos, no software QGIS. No software livre SAGA GIS, os mapas morfométricos foram projetados para SIRGAS 2000 23S, cortados para o contorno da bacia de estudo, submetidos a um pré-processamento proposto por Wang e Liu (2006), (comando *Fill Sinks*) para preencher e identificar os vazios criados pelas depressões da superfície, mantendo sua declividade e podendo, com isto, gerar os dados hidrológicos a partir dos modelos de elevação. Então, os parâmetros morfométricos como declividade, orientação de vertentes, convexidade e textura, foram criados a partir do comando (*Slope, Aspect, Curvature*), baseado em Zevenbergen e Thorne (1987). Seus resultados foram expressos em radianos (*rad*), sendo que 0 a 1,5 rad é proporcional à 0° a 90°.

O mapa de convexidade, ou seja, a curvatura positiva do terreno, foi obtido com a ferramenta '*Terrain Surface Convexity*', construída por reamostragem e filtro laplaciano de Kernel, por vizinhos próximos. A textura gerada pela ferramenta '*Terrain Surface Texture*', representa a rugosidade do terreno, através do método de contagem de células e ordenado de acordo com a área (picos e fossas), dado através da função de ponderação de Gauss e que expressa a unidade adimensional, adicionados por O. Corand (c) 2012, ao software SAGA GIS.

A curvatura de perfil, sendo a curvatura vertical, descreve a curvatura da superfície do terreno no sentido do declive (SCCOTI, ROBAINA e TRENTIN, 2016), ou seja, mostra a forma da vertente, fundo dos vales e topos, mostrando se são convexos, côncavos ou retilíneos. Nos valores positivos temos as curvaturas convexas, representadas pelos picos das áreas mais elevadas, e côncavas quando os valores são negativos, por exemplo nos fundos de vales e cursos d'água. A curvatura de perfil traz maior embasamento aos mapas usados para aplicação do modelo de classificação de terreno.

Com a ferramenta *SAGA Wetness Index* (similar ao TWI), foi determinado o escoamento da bacia (*catchment area*), onde prediz os pontos que estão situadas nos vales e lugares com menor distância dos cursos d'água expondo uma situação mais realista das áreas úmidas (BOEHNER, J. et al. 2002 e BOEHNER, J. e SELIGE, T., 2006).

Os mapas com as características dos solos, como o ângulo de fricção interno, coesão, tipos de solo, uso do solo e a condutividade hidráulica, foram rasterizados usando o

interpolador IDW, que assume que os valores ao redor da amostra são similares (Yang W, 2020), sem mudar os dados, pois a condutividade hidráulica geralmente muda com frequência dependendo do tipo de solo e da sua profundidade, assim como os demais parâmetros. A densidade foi rasterizada com a ferramenta *Shapes to Grid*, levando em consideração os tipos de terreno de Iwahashi e Pike, (2007) variando de 1.2 g/cm<sup>3</sup> a 2.48 g/cm<sup>3</sup>.

O modelo SHALSTAB foi aplicado por meio do software SAGA GIS, com a ferramenta SHALSTAB, e foram usados os parâmetros: modelo digital de elevação, declividade, densidade, condutividade hidráulica, espessura do solo, ângulo de atrito interno e a coesão dos solos. Foram desenvolvidos dois casos, sendo o Caso A, uma aplicação com os parâmetros constantes e usando os dados obtidos em máximo e mínimo, e o Caso B aplicando os parâmetros de forma variável espacialmente.

Entre os métodos de aplicação do modelo tem-se o software usado SAGA GIS e também o conhecido software GRASS GIS. Para uma comparação entre os dois programas foram usados os mesmos parâmetros gerados para o Caso B na ferramenta *r.shalstab* que foi uma extensão adicionada ao GRASS.

Para o modelo AHP foi necessário os parâmetros como o TWI que foi feito através do software SAGA GIS usando a ferramenta TWI. Para calcular o NDVI foi usado o software QGIS com imagens do Sentinel 2A- MSI de 2021, através da fórmula 16.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (16)$$

Vemos que a banda B8 é espectro de infravermelho próximo e a banda B4, o vermelho, como vemos na fórmula 16. Com as variáveis rasterizadas, foi gerado a análise AHP no software LibreOffice Calc e então com os valores satisfatórios de CR, foi gerado com o software QGIS, usando a calculadora *raster*, para multiplicar cada fator pelo seu peso final. O Caso B também foi analisado com os resultados obtidos pela AHP.

Para melhor visualização da relação de alguns mapas foi usada a regressão linear que

é simplesmente ver a correlação entre duas ou mais variáveis (NETER et al. 1996), com uma reta, no caso  $Y = a - b.x$ . Com a fórmula ajustada calculasse os resíduos somando o quadrado do desvio vertical  $R^2$ , para um grupo de amostra do mapa de 1000 *pixels*, sendo que quanto maior o valor de  $R^2$  melhor a definição da reta, isso será notado ao plotar o gráfico de dispersão, podendo com isso obter uma melhor visibilidade da relação dos mapas criados.



## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir, pode-se observar os resultados relativos às pesquisas e modelagens descritas na metodologia desta pesquisa.

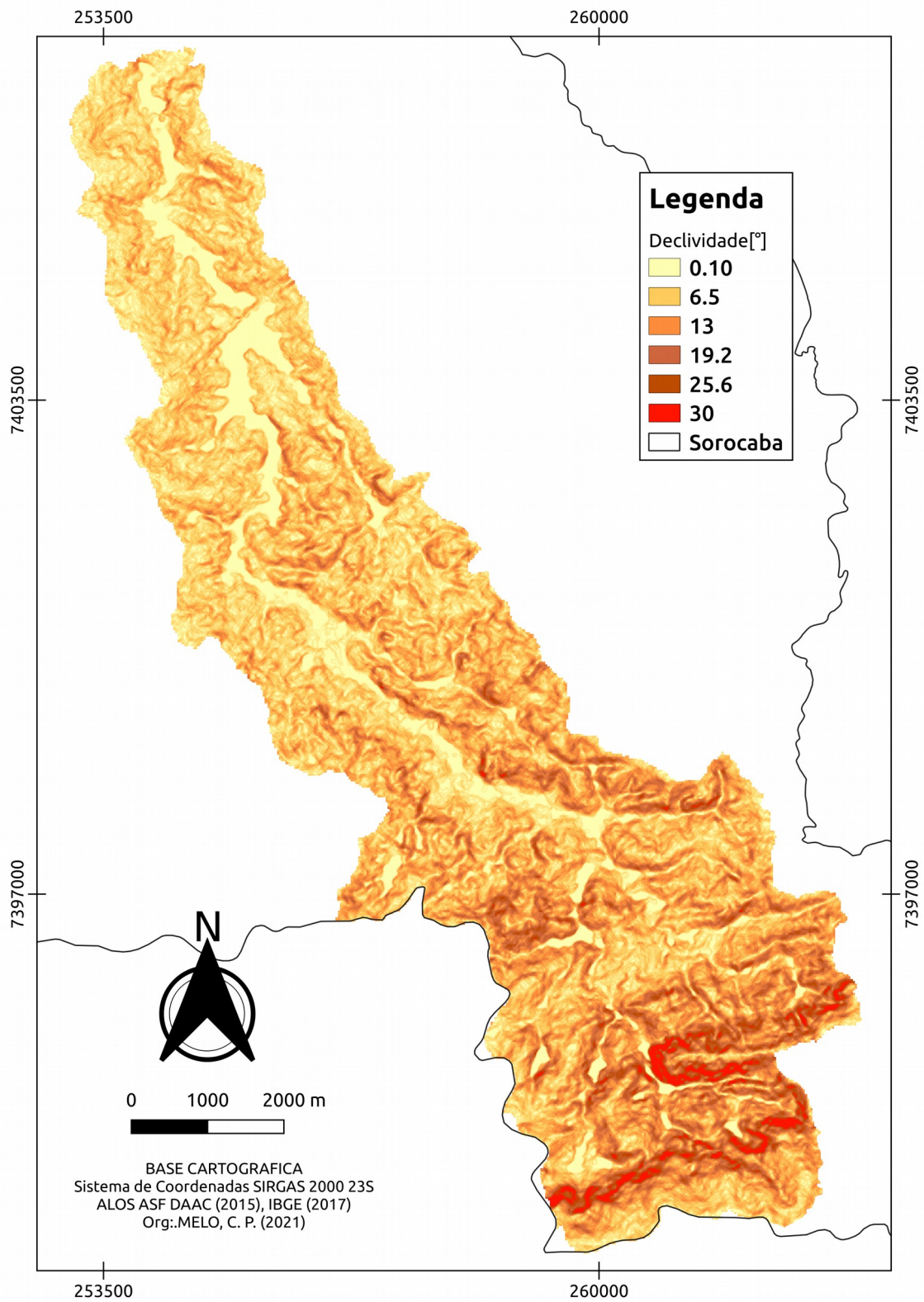
### 5.1 Dados da bacia a partir dos modelos digitais de elevação

Os dados morfométricos, são apresentados a seguir. Com relação à declividade (Mapa 7), é um fator de condição para os processos de forma e estrutura (SCCOTI, ROBAINA e TRENTIN, 2016). Como altitude (Mapa 6) também é um fator importante para caracterização das áreas de suscetibilidade, na área de estudo temos alturas de 559 metros até 1027 metros. Notamos que a maior parte dos pontos de declividade na bacia (Mapa 7), apresenta baixa declividade, que ficam entre 5° a 15° de inclinação, e outra aglomeração de pontos que é maior que 20° que se localiza nas áreas de maior altitude. Sabemos que na bacia tem solos situados em locais com alta declividade e características que nos períodos de chuva os processos de erosão ocorrem com maior constância (OLIVEIRA *et al*, 1999) como vemos os pontos urbanos localizados nas áreas de maior declividade.

As zonas urbanas na bacia são pontuais, localizadas geralmente nas partes com declividade baixa exceto a Vila Astúrias e Brigadeiro Tobias. Dentro da bacia, se localiza varias empresas, que tendem a seguir as licenças ambientais, e as próprias zonas de preservação, zonas de chácaras e rurais, etc.

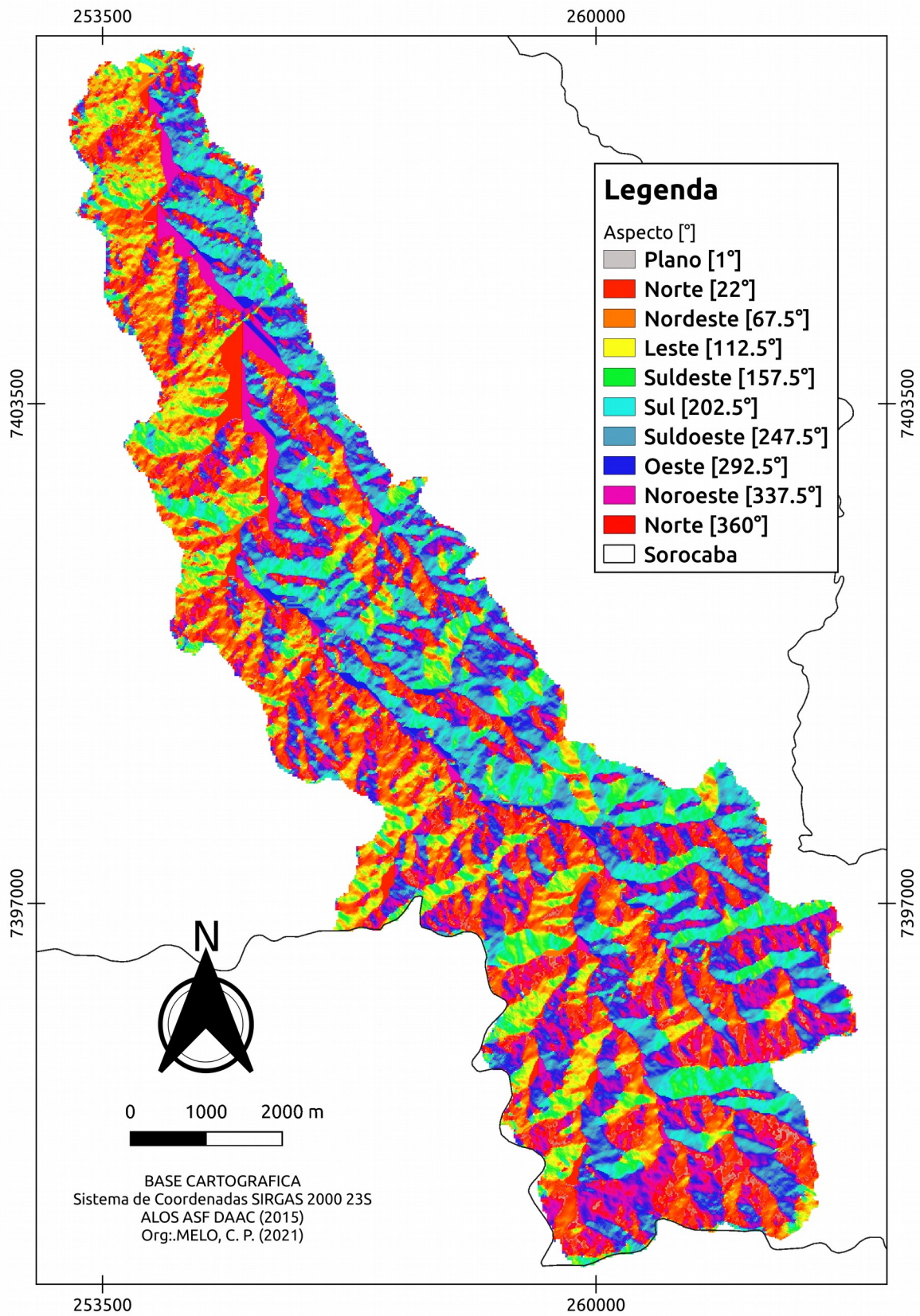
O Mapa 8, mostra a orientação das vertentes, notamos que maior parte das vertentes são voltadas ao norte, nordeste e noroeste, mas também tem as áreas voltadas ao sul representadas. Com o orientação de vertentes podemos ver as orientações dos vales, morros podendo ser mais ou menos propensos a umidade de acordo com sua orientação (norte, sul, leste, oeste) e exposição ao sol. Dependendo se tiver maior ou menor radiação solar considerando a radiação direta e difusa A maior parte da bacia está entre 4° e 20° de declividade recebendo alta radiação. Entretanto os lugares de maior altitude dentro da bacia não apresenta radiação solar na mesma proporção que às áreas de menor altitude, com isto às áreas de maior altitude tem maior declividade aumentando a probabilidade de ser uma área suscetível, ao compreender que sendo uma área com menor radiação solar é mais úmida.

Mapa 7: Declividade



Fonte: Elaborado pela autora.

Mapa 8: Orientação de vertentes



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao observar a curvatura de perfil (Mapa 9) nas áreas planas e onde estão situados os cursos d'água o valor é zero. Observa-se ao nordeste da bacia um aumento da aglomeração de pontos côncavos e convexos, que constatamos pelo mapa geológico (Mapa 3) os metassedimentos e o Maciço São Francisco.

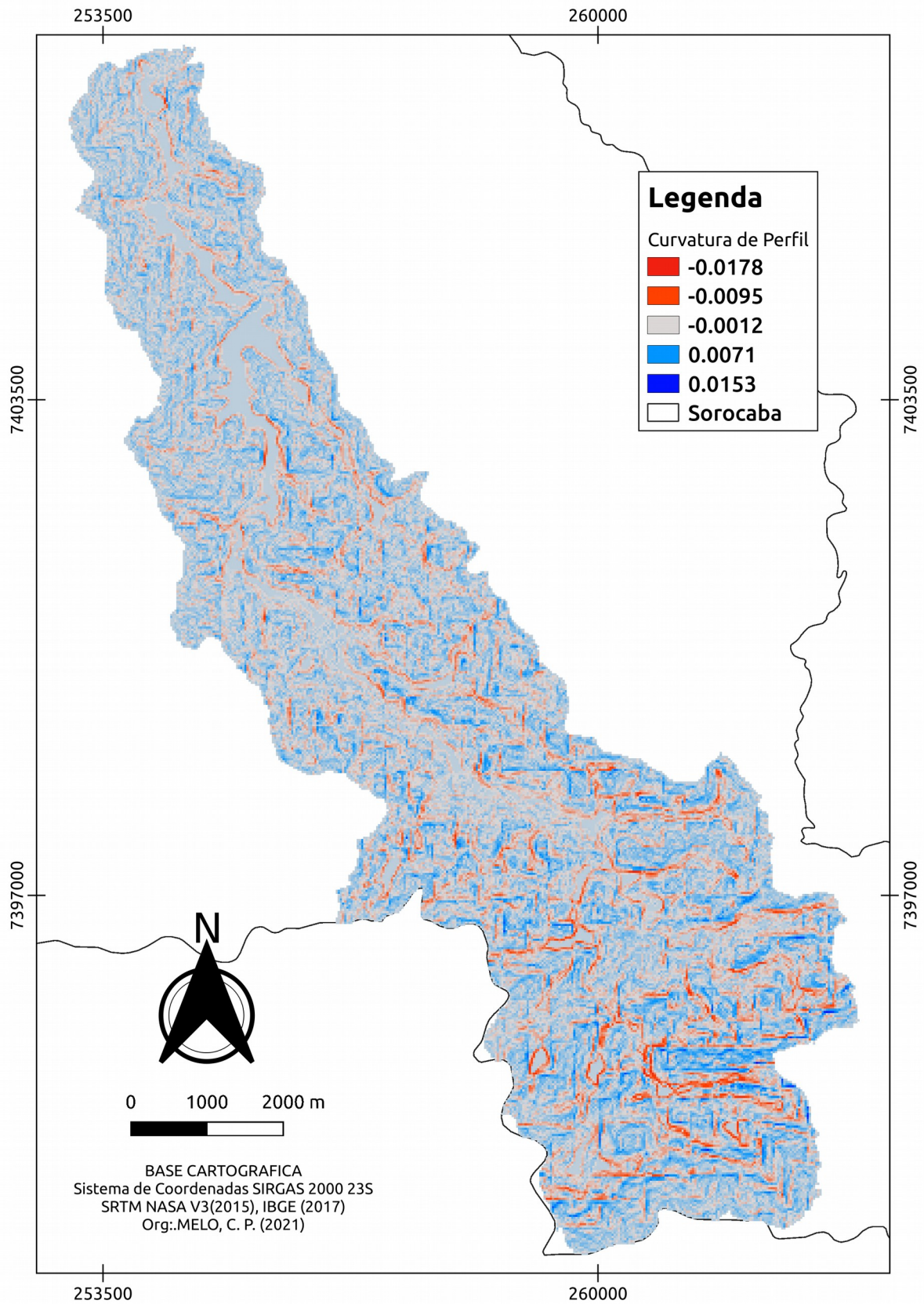
Com maior detalhe das áreas convexas, a curvatura positiva é exposta no Mapa 10. A convexidade apresenta uma alta densidade de pontos com baixa convexidade a jusante da bacia, mas indo para o norte temos pontos densos com alta convexidade. Como cita Nunes *et al.* (2016) as vertentes interferem no escoamento, como vemos as áreas em azul são onde fica os cursos de água.

O Mapa 11, mostra a textura do relevo representando a rugosidade ordenada de acordo com a área (picos e fossas), com isto vemos similaridade com os dados dos mapas anteriores, expondo em azul as áreas de menor declividade e altitude enquanto às áreas em vermelho são os pontos de maior rugosidade.

No Mapa 12, escoamento da bacia (*Catchment area*), que a classes 1, é representada pelas áreas de maior distância de escoamento, ou seja com menor fluxo e umidade. Na classe 8, temos menor distância de escoamento onde estão às áreas úmidas e os cursos d'água. Notando na bacia que a maior parte dos pontos de nascentes e fluxos ficam no começo da bacia concordando com a configuração de Listo e Carvalho Vieira (2010).

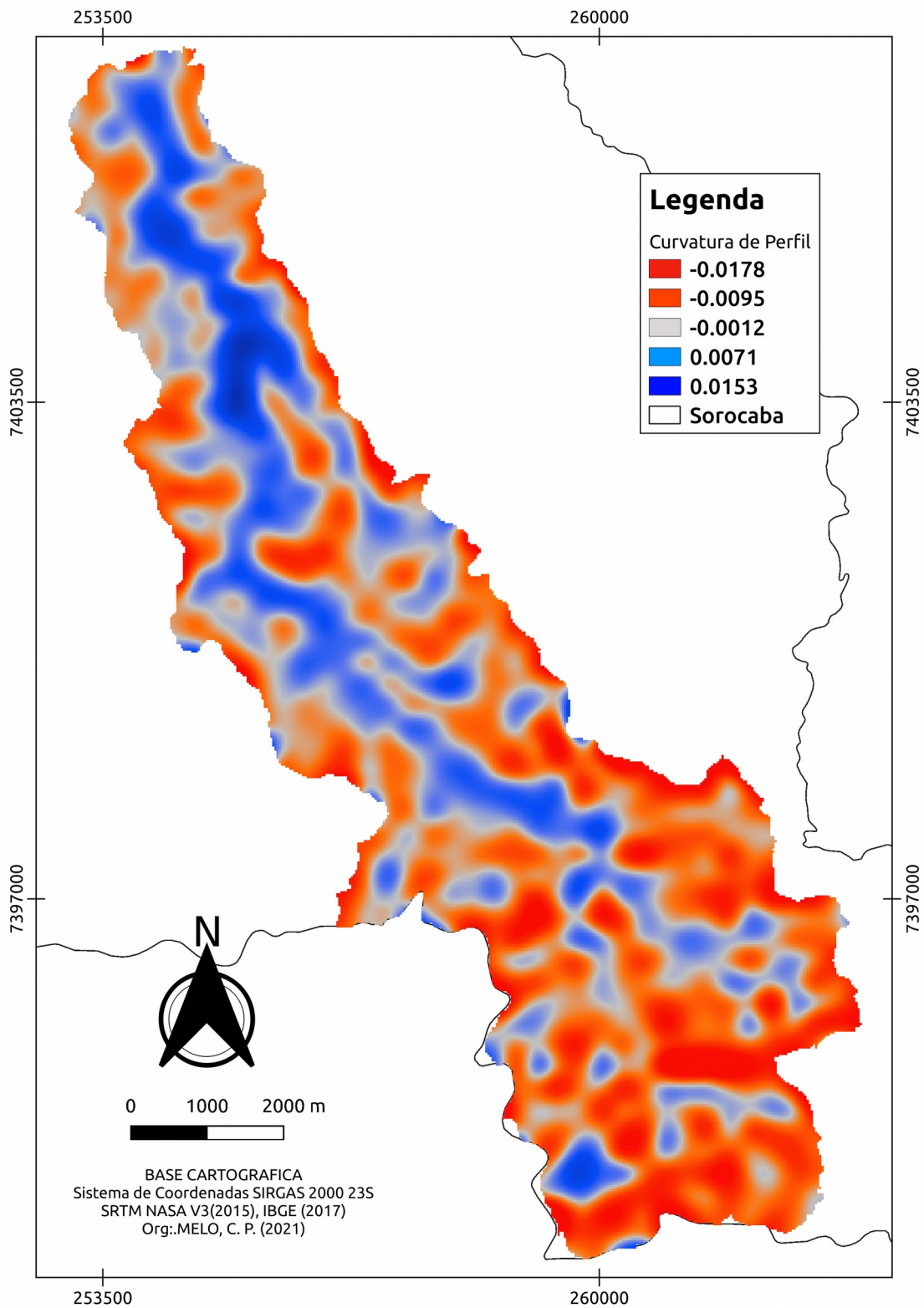


Mapa 9: Curvatura de Perfil



Fonte: Elaborado pela autora.

Mapa 10: Convexidade da bacia

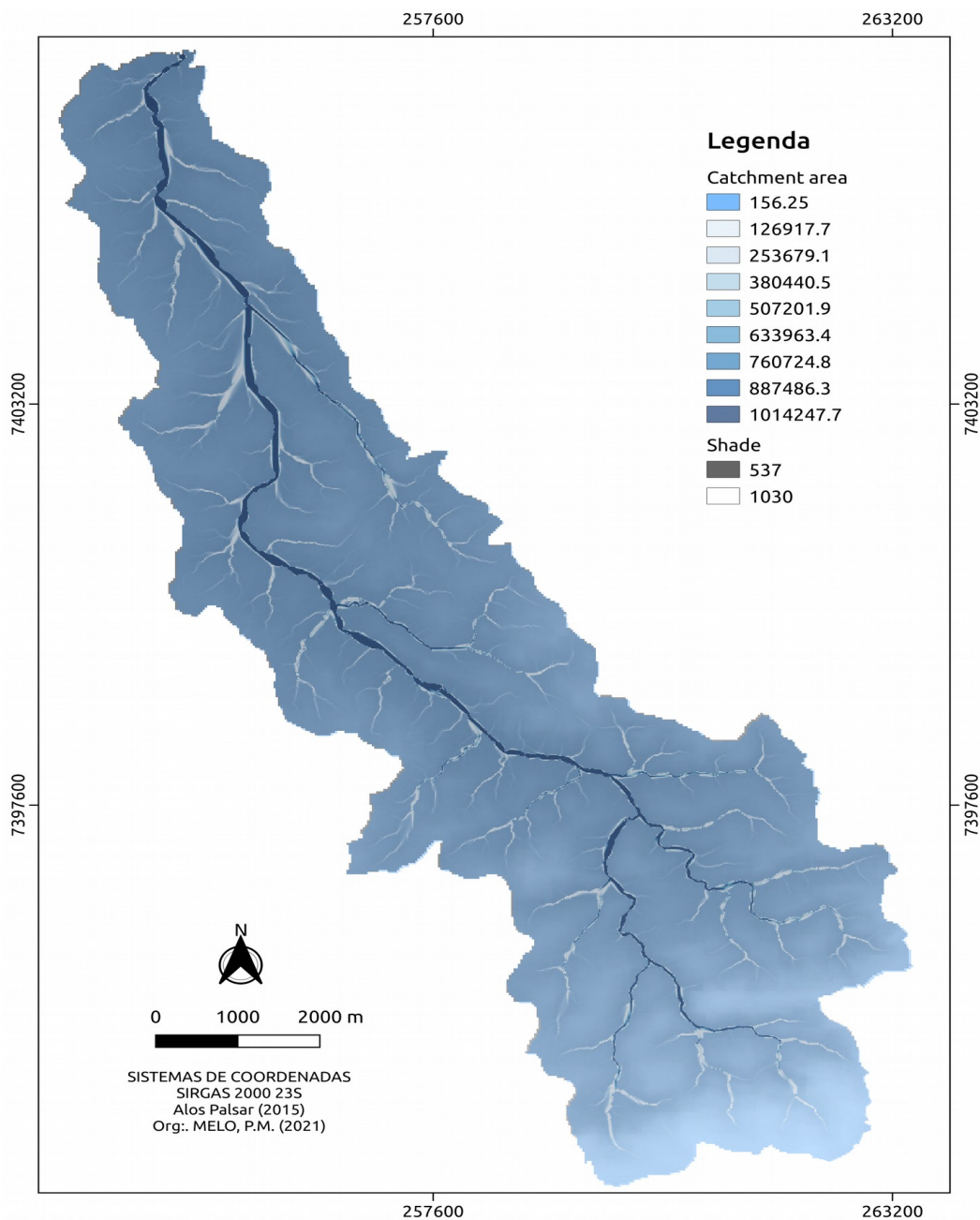


Fonte: Elaborado pela autora.

O Mapa 12, mostra a textura do relevo representando a rugosidade ordenada de acordo com a área (picos e fossas), com isto vemos similaridade com os dados dos mapas anteriores, expondo em azul as áreas de menor declividade e altitude enquanto às áreas em vermelho são os pontos de maior rugosidade.

No Mapa 11, escoamento da bacia (*Catchment area*), os valores menores são representados pelas áreas de maior distância de escoamento. Nos valores menores, representa as menores distância de escoamento.

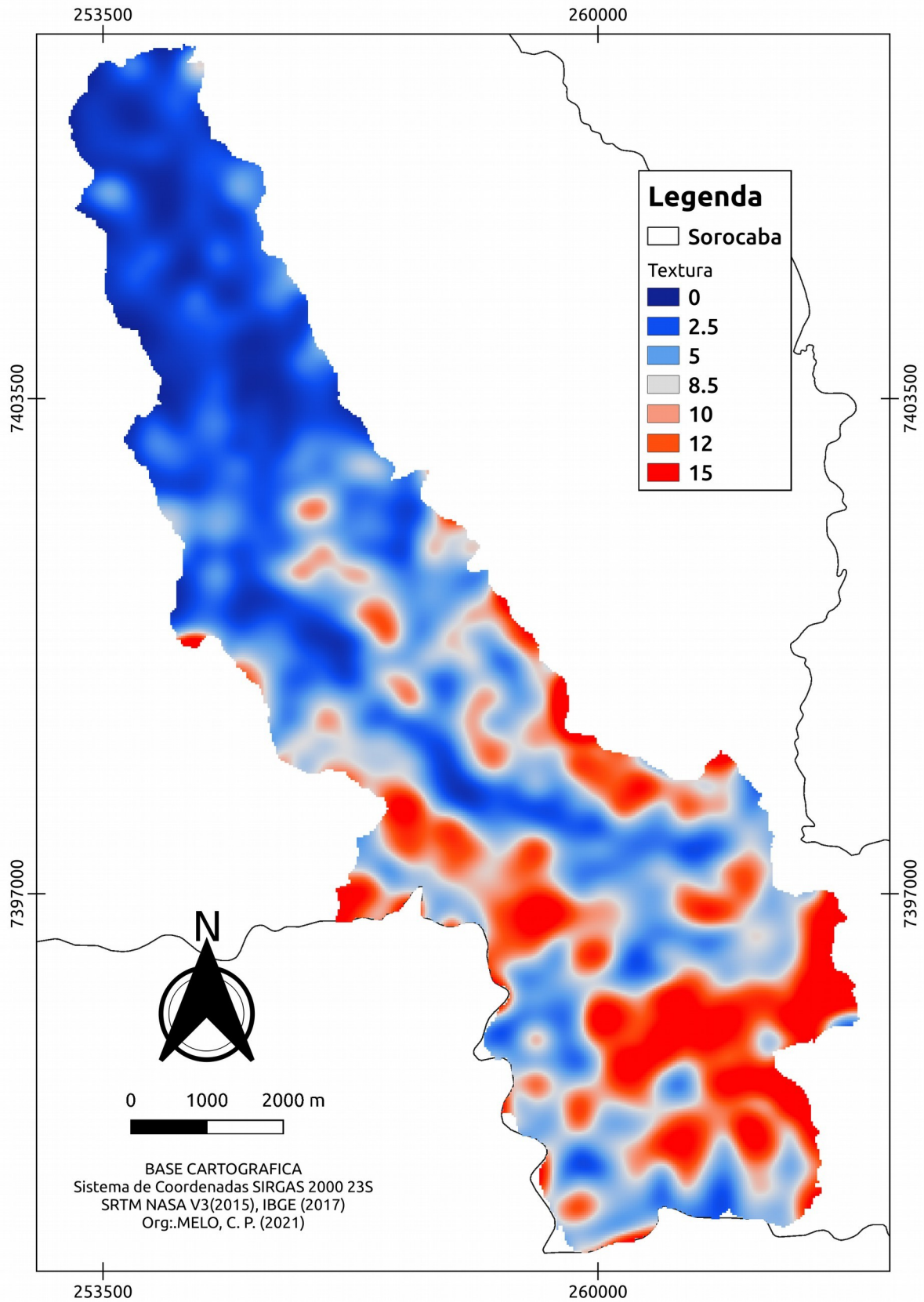
Mapa 11: Escoamento da bacia



Fonte: Elaborado pela autora.



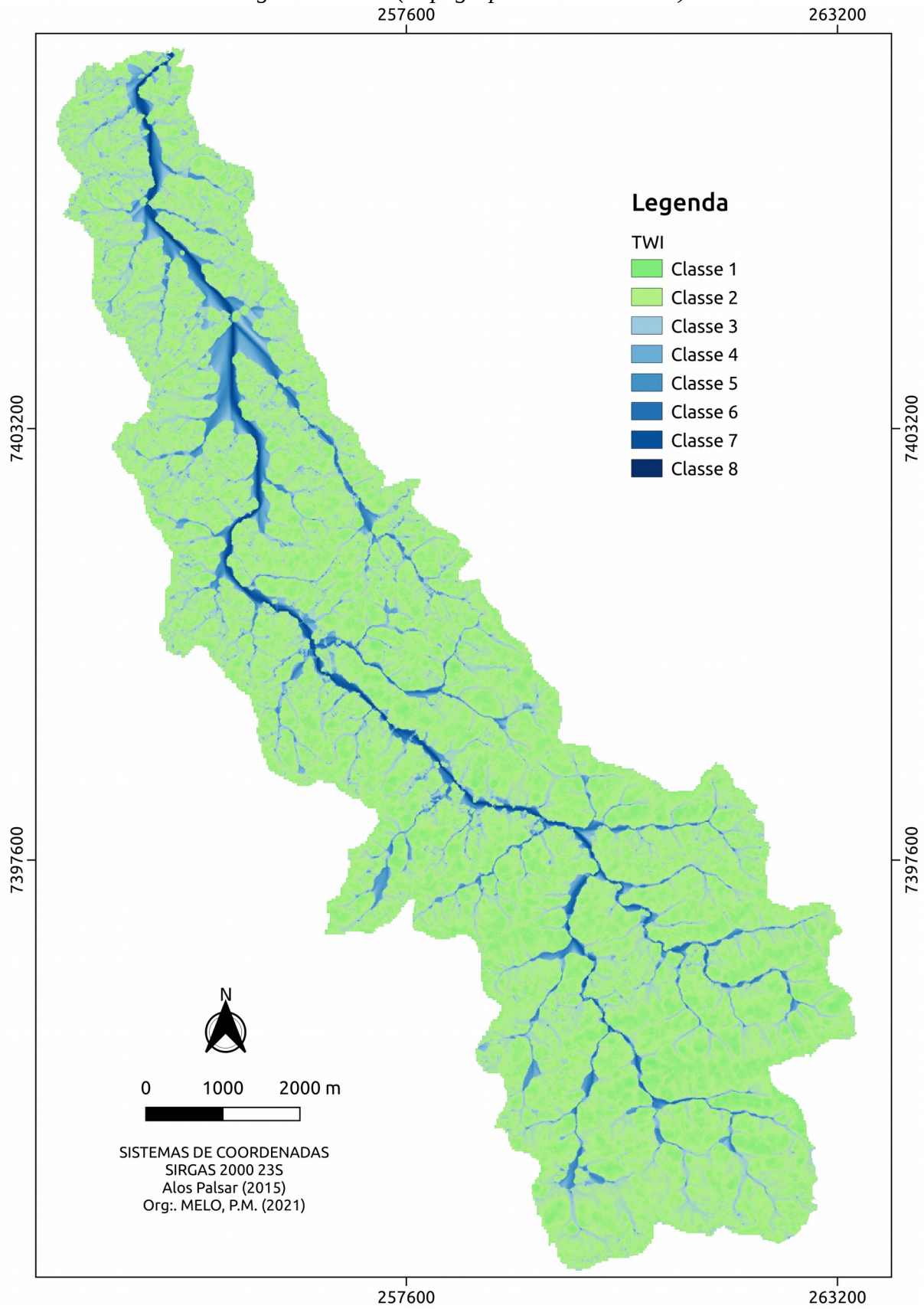
Mapa 12: Textura



Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 18: TWI (Topographic Wetness Index)



Fonte: Elaborado pela autora.

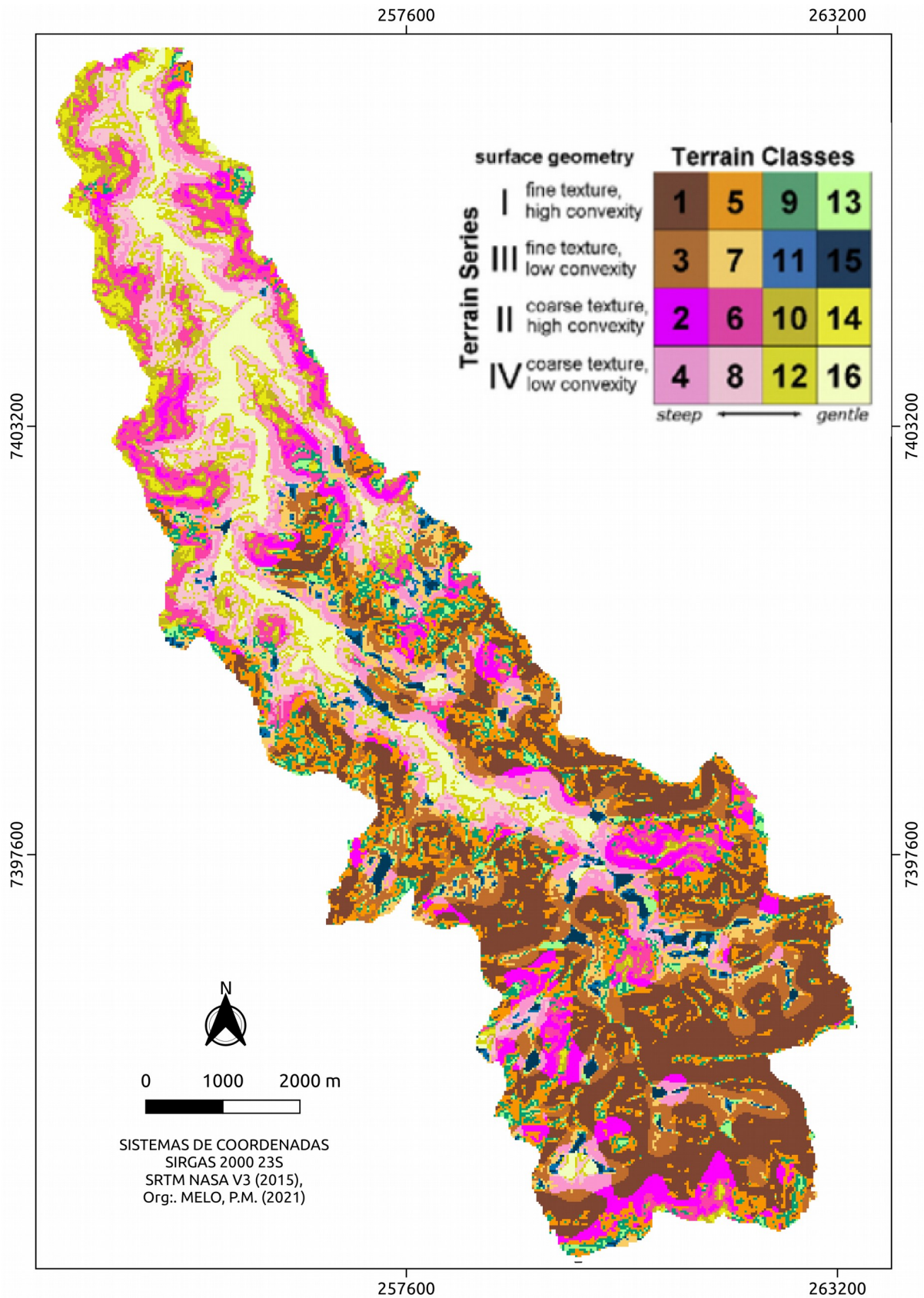
No Mapa 18, (TWI) Índice Topográfico de Umidade, que a classes 1, é representada pelas áreas com menor escoamento, ou seja com menor fluxo e umidade. Na classe 8 às áreas úmidas e os cursos d'água. Notando na bacia que a maior parte dos pontos de nascentes e fluxos ficam no começo da bacia concordando com a configuração de Listo e Carvalho Vieira (2010).

Através dos mapas de declividade, convexidade e textura já apresentados, foi criando as 16 formas de terreno, mostrado no Mapa 13, classificando através dos atributos morfométricos, com eles distinguindo os tipos de terreno, como os compartimentos geomorfológicos, baseado em Iwahashi e Pike (2007), às montanhas íngremes da classificação nos níveis 1 e 3 são representadas pela Serra de São Francisco, parte fica nos metassedimentos do grupo São Roque, onde se tem às rochas cristalinas. Os relevos suaves e colinos são partes das classes 2, 4, 6, 8, 14 e 16 que prefiguram as rochas da bacia do Paraná.

As classes 1 e 3, que são os pontos de maior altitude e íngremes como a Serra de São Francisco, fazem parte do Planalto Atlântico, onde dominam rochas cristalinas do embasamento, por estar no limite com as áreas baixas da Depressão Periférica; as classes 5 e 7 de colinas ou morros de baixo relevo estão sucintamente dispersas acompanhando os níveis de menor declividade da bacia como as classes 12 e 14 que situam se na baixa declividade. As classes 9, 11, 13, 15 são normalmente os terraços. Geralmente as classes 2, 4, 6, 8 são classificadas como grandes leques aluviais e leques dissecados especialmente em locais de predomínio de rochas cristalinas. Já na classe 16 ficam as planícies aluviais recentes.

Relacionando com as 16 classes de terreno o parâmetro de densidade do solo (Mapas 14 e 15). Sendo a densidade aparente máxima e mínima para cada tipo de solo.

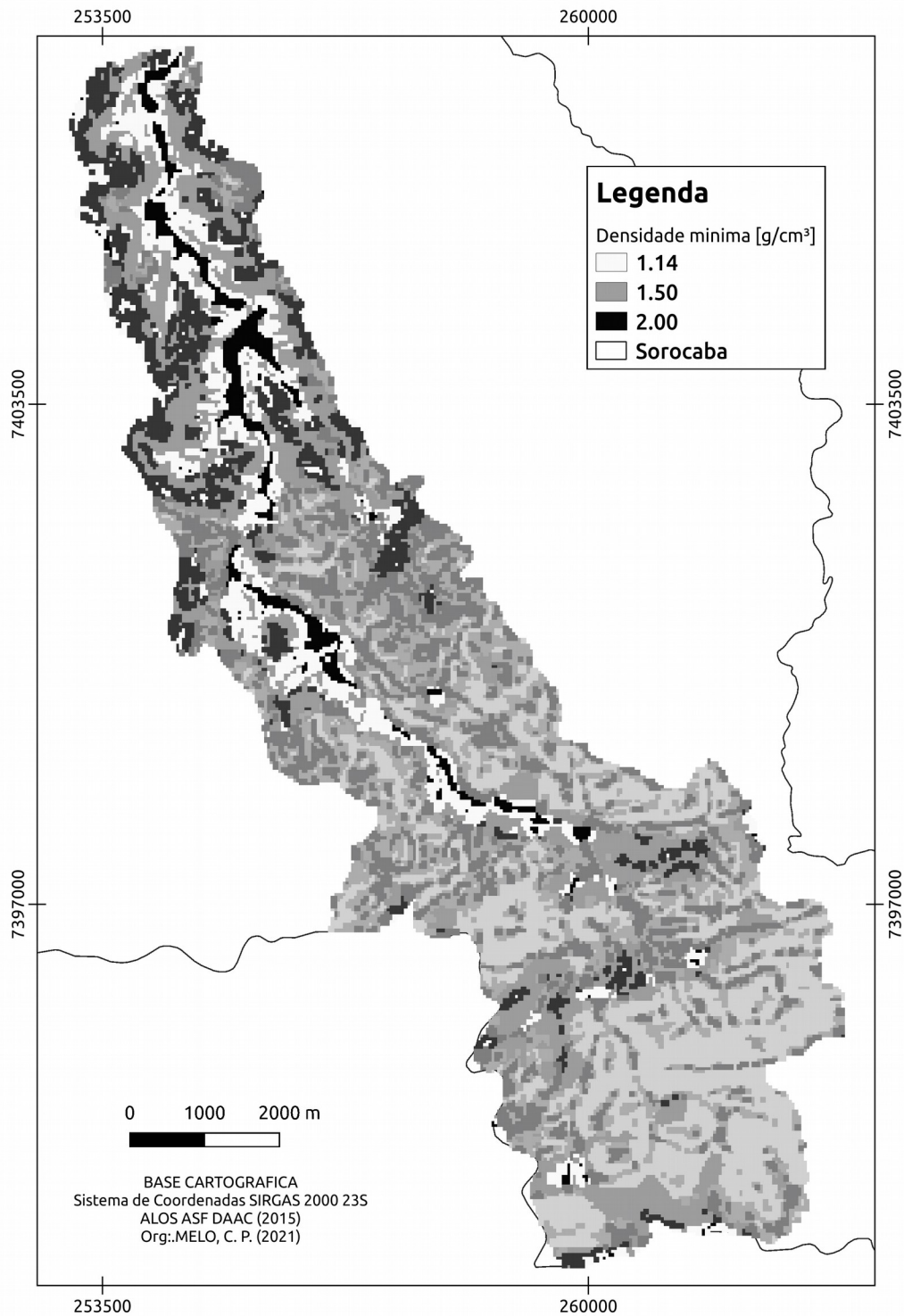
Mapa 13: Formas de Terreno



Fonte: Elaborado pela autora.

A densidade mínima (Mapa 14), varia de 1.84 á 2.2 g/cm<sup>3</sup> , vemos que na área do Rio Pirajibú - Mirim, a densidade máxima (Mapa 15) fica entre 2.05 de 2.50 g/cm<sup>3</sup> ou seja é o lugar onde tem a maior densidade e seu entorno a menor densidade.

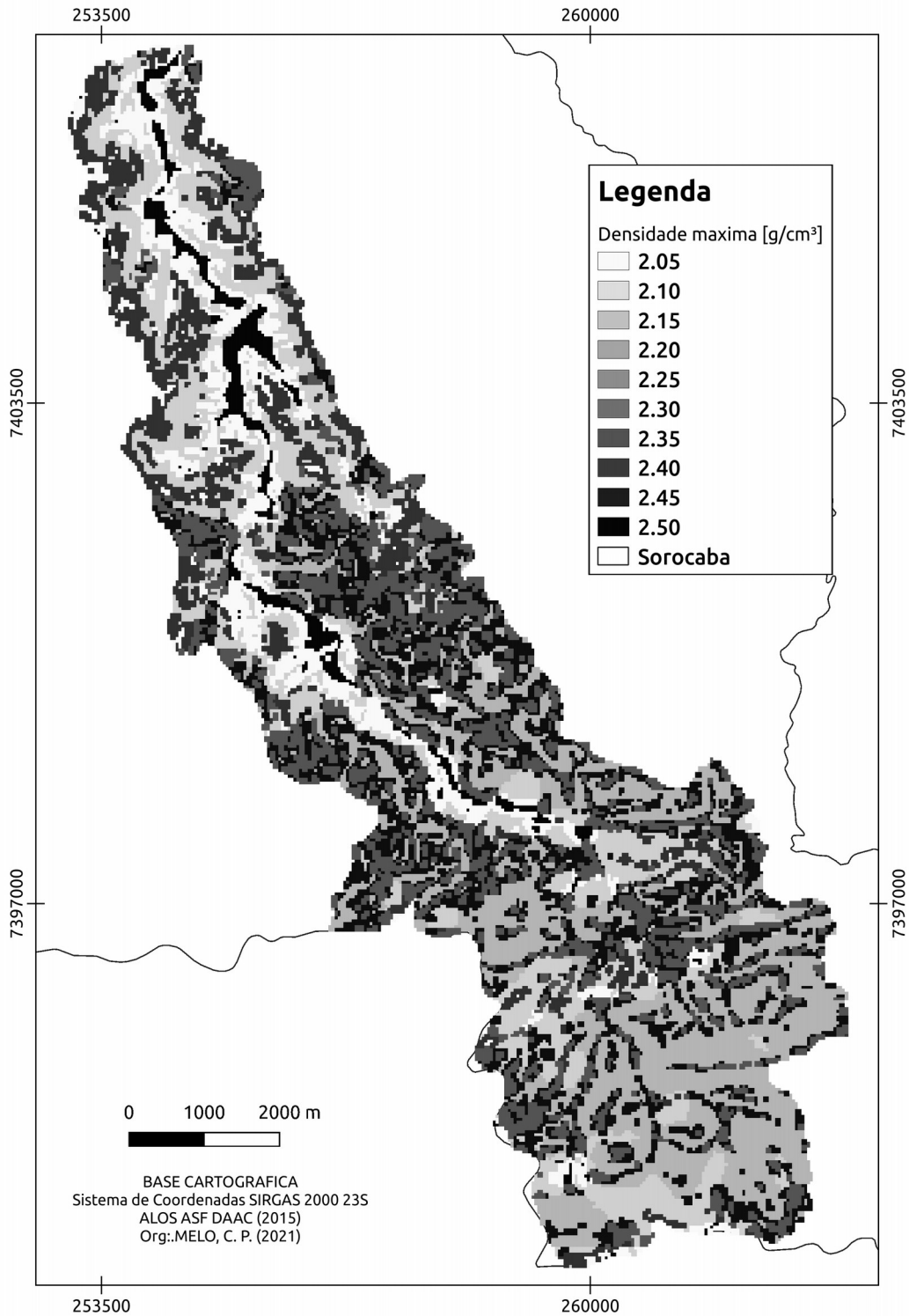
Mapa 14: Densidade aparente mínima do solo



Fonte: Elaborado pela autora.



Mapa 15: Densidade aparente máxima do solo

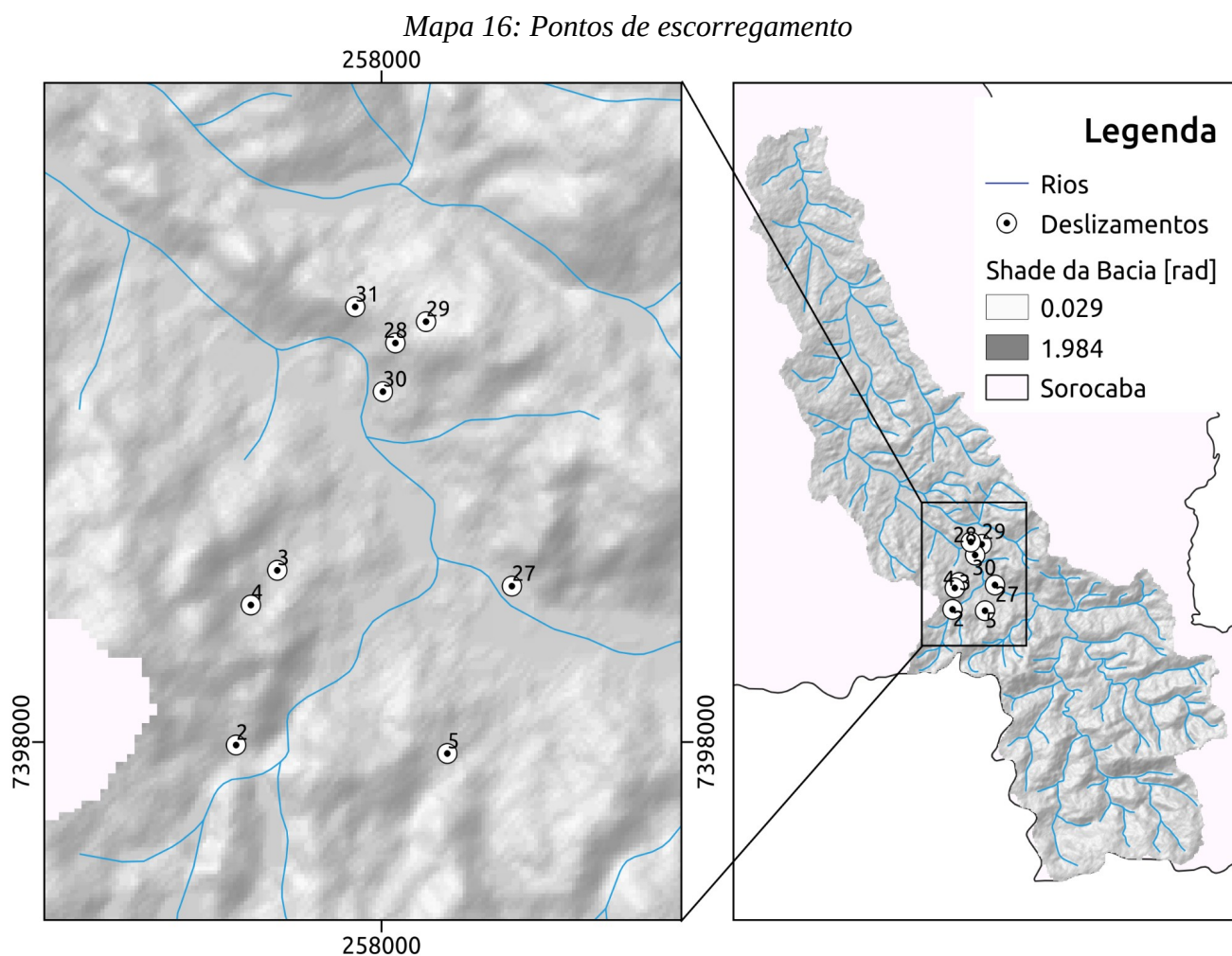


Fonte: Elaborado pela autora.

Com as imagens digitais de elevação foi possível obter a morfometria da área e suas características, podendo através destes dados gerar os modelos e análises pertinentes.

## 5.2 Histórico de escorregamento na bacia de estudo

De acordo com a Defesa Civil de Sorocaba existem 50 pontos de risco de escorregamentos (ANEXO I), estes sendo a maioria em áreas da periferia do município. Destes pontos, nove pontos estão inseridos nesta bacia de estudo, como disposto no Mapa 16.



Nestes pontos cadastrados pela Defesa Civil, os casos de ocorrência de escorregamentos estão concentrados nas áreas urbanas, como no Bairro do Brigadeiro Tobias (Pontos 1, 2, 3, e 4) e Vila Astúrias (27, 28, 29, 30 e 31).

As imagens do *Google Earth* (2021), a seguir, permitem observar com maiores detalhes a situação destes pontos cadastrados (FIGURAS 18 a 22). A princípio, vemos na Figura 18 que o corte de estrada e arruamentos aumenta a inclinação do talude e expõe a maior risco de movimentação de massa (IRIGARAY, 2000 e MILIGAN, 2005).

*Figura 19: Ponto 5, vista da Rua Victor Gomes Corrêa em Brigadeiro Tobias*



Fontes: *Google Earth* (2021).

*Figura 20: Rua Antônio Fratti*



Fontes: *Google Earth* (2021).

Podemos notar as feições do ponto 3, onde foi registrado a instabilidade pelo Relatório IG-CEDEC (2004) na Figura 22, com a mesma configuração vemos em 2021 exposto nas figuras 20 e 21.

Com na imagem da Figura 22, podemos notar que não houve nenhuma alteração, exceto que pelo fato da área estar mais vegetada. Em maior detalhe vemos na Figura 20, que a falta de infraestrutura causa essa feição erosiva.



*Figura 21: Ponto 2 em detalhe(2021), vista da Rua Santo Eduardo em Brigadeiro Tobias*

155 R. Santo Eduardo Brg. Tobias, São Paulo



Fontes: Google Earth (2021).

*Figura 22: Ponto 3 (2021), vista da Rua Santo Eduardo em Brigadeiro Tobias*



Fontes: Google Earth (2021).



Figura 23: Ponto 3 (2004), vista de Rua Santo Eduardo em Brigadeiro Tobias



Fontes: Relatório IG-CEDEC (2004).

Nestes pontos de ocorrência (Mapa 16), apresentam instabilidade de terreno que podem indicar áreas de possíveis riscos a escorregamentos, colocando moradias em risco (INSTITUTO GEOLÓGICO, 2004).

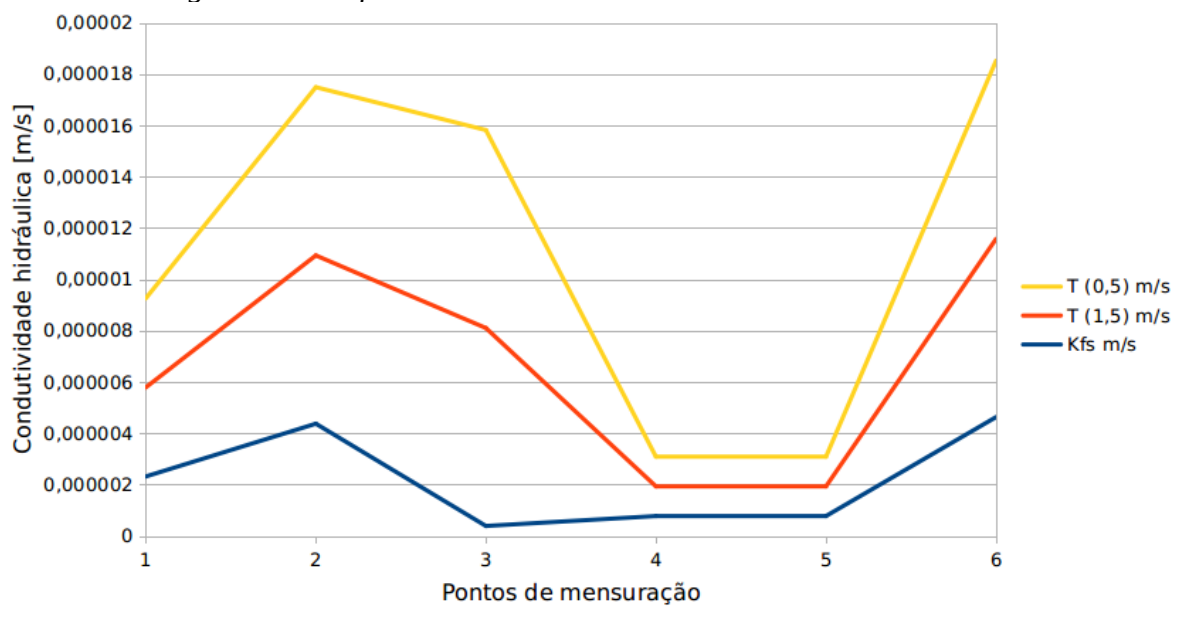
Observam-se orientação de vertentes consonantes com Persichillo *et al.* (2018) e Listo e Vieira (2012), tem-se nestas áreas (Figura 18, 19, 20, 21 e 22) de cortes irregulares e construções desordenadas sem infraestrutura, apresentando o espalhamento de sedimentos oriundos da vertente nas ruas e o sistema de drenagem de águas pluviais em situação precária.

### 5.3 Condutividade hidráulica $K_s$

Obtido *in loco*, com o permeâmetro confeccionado, temos os dados de condutividade hidráulica  $k_s$  (Figura 23), sendo estes coerentes com as áreas de mensuração, ou seja, os

dados obtidos apresentavam, em solos com boas características de drenagem,  $k_s$  de  $10^{-2}$  m/s e solos pobres drenagem com  $10^{-3}$  m/s, como em solos mais argilosos, de acordo com Terzaghi, Peck e Mesri (1996). Podendo com isso gerar o Mapa 17, de condutividade hidráulica.

Figura 24: Gráfico dos valores médio de  $K_s$  e de transmissividade



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao analisar os dados obtidos com o uso do permeâmetro de Guelph e das cicatrizes de escorregamento por Gomes e Vieira (2016), observa-se que os pontos mensurados de condutividade hidráulica na bacia apresentam valores baixos de  $10^{-6}$  m/s,. Entretanto, os resultados são maiores que os dados de Bielschowsky et al. (2012), para os argissolos que chegaram a  $10^{-8}$  m/s.

Com relação à transmissividade, nota-se que ao aumentar a profundidade do solo, os valores aumentam chegando a  $10^{-4}$  m/s, que é o maior valor encontrado nas cicatrizes por Gomes e Vieira (2016), ou seja quanto maior a profundidade da cicatriz maior a condutividade e transmissividade da água.

*Figura 25: Represa do Ferraz nos arredores dos pontos 1, 2 e 3*



Fontes: Foto tirada pela autora (2020).

Os pontos de mensuração 1, 2 e 3, situados nas classes 16 e 12 da classificação de Iwahashi e Pike (2007), estão em consonância com os tipos de terreno classificados, uma vez que esta é uma área de planície aluvionar, muito próximo do nível de afloramento do lençol freático, nos arredores da Represa do Ferraz, como mostra a Figura 24. Nota-se que estes três pontos situam-se em uma área que foi modificada com a criação da Rodovia Senador Ermírio de Moraes.

Os pontos 4 e 5 localizam-se a jusante do Rio Pirajibú-Mirim (Figura 25), nos arredores da confluência com o Rio Pirajibú, sendo classificados como classes 10 e 14, caracterizadas de baixa/moderada declividade. As áreas relacionadas à classe 14 são classificadas como terraço aluvial e apresentam baixa drenagem. O sexto ponto, uma área elevada no Bairro do Brigadeiro Tobias, com características da classe 2, com alta declividade, apresentando valores altos de condutividade hidráulica, característicos dos solos férteis e com fácil drenagem.

Observou-se também nos pontos de barrancos nas estradas (Figuras 26 e 27), alguns sinais de escoamento, aumentando assim a possibilidade de erosão, sendo que normalmente a água procura o caminho mais fácil de fluxo, aumentando as feições erosivas, o que pode gerar perigo aos moradores que passam por estas estradas.



*Figura 26: O Rio Pirajibú - Mirim nos arredores dos pontos 4 e 5*



Fontes: Foto tirada pela autora (2020).



*Figura 27: Talude nos limites do Bairro de Brigadeiro Tobias*



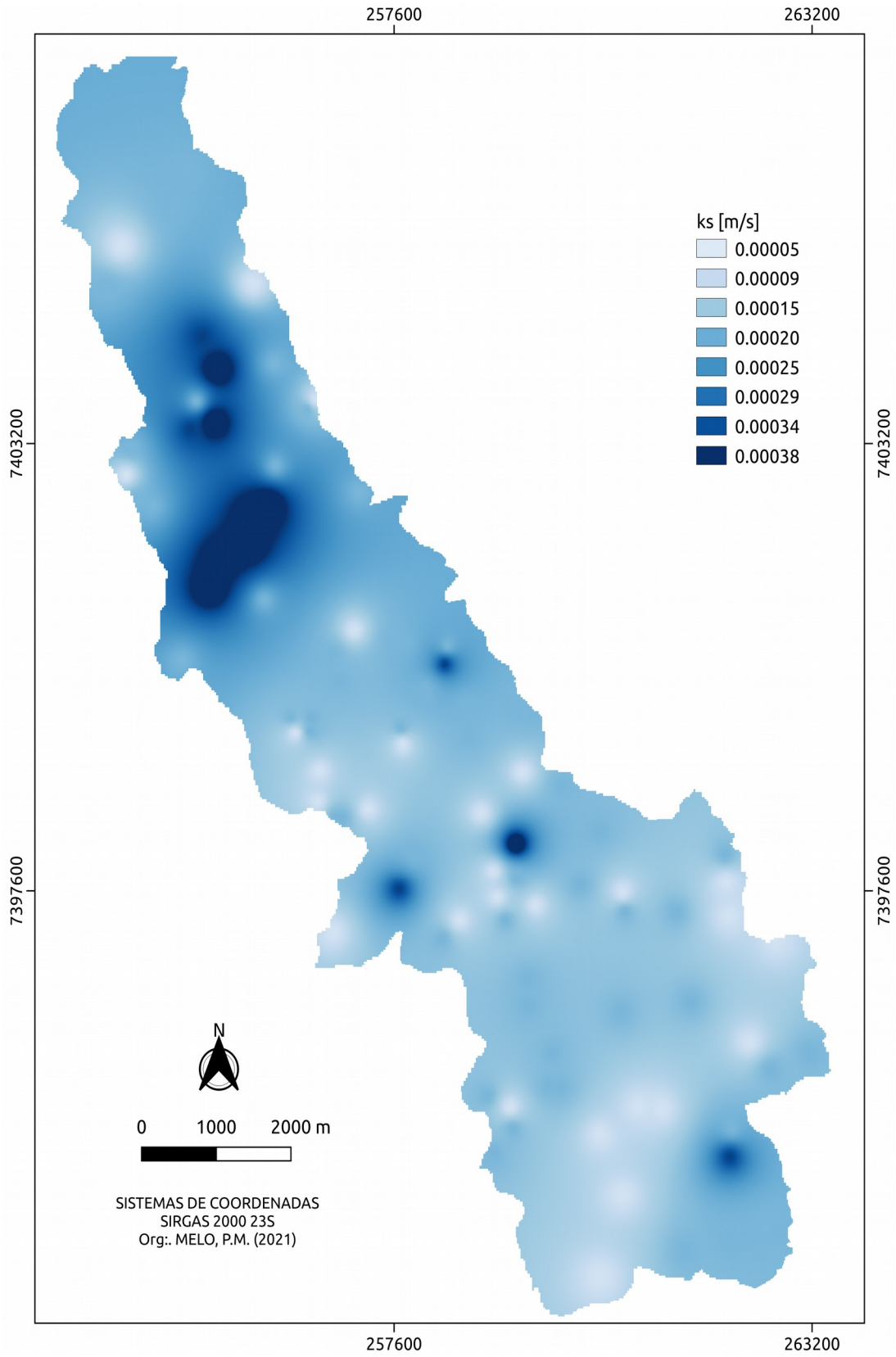
Fontes: Foto tirada pela autora (2020).

*Figura 28: Talude nos limites da Bairro do Brigadeiro Tobias*



Fontes: Foto tirada pela autora (2020).

Mapa 17: Condutividade hidráulica



Fontes: Elaborado pela autora.

## 5.4 Rede Neural Artificial

Com relação aos dados de coesão e ângulo atrito interno dos solos, estes foram obtidos por meio do emprego da técnica de RNA (código em ANEXO II). Analisando os parâmetros de treino e teste como a média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo temos as Tabelas 6 e 7 representando os dados de treino, ambas com 43 linhas, e a Tabela 8 com os dados de teste, tendo 74 linhas. Às tabelas de treino, foram criadas através da união dos dados contidos na Tabelas 1 juntamente com os dados de granulometria padrão para o treinamento da coesão e de igual modo para o treinamento do ângulo de fricção interno usando a Tabela 2.

TABELA 6 - DADOS DE TREINO DA COESÃO

<b>Parâmetros</b>	<b>Coesão</b>	<b>Areia</b>	<b>Cascalho</b>	<b>Finos</b>	<b>Compactado</b>	<b>Saturado</b>
	<b>[MPa]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Máx.	103	95	95	100	100	100
Média	31.56	25.62	16.4	58	50	32.5
Mediana	15	10	5	60	50	0.00
Desvio padrão	31.6	31.0	21.6	36.3	50.6	47.4

Fonte: Elaborado pela autora.



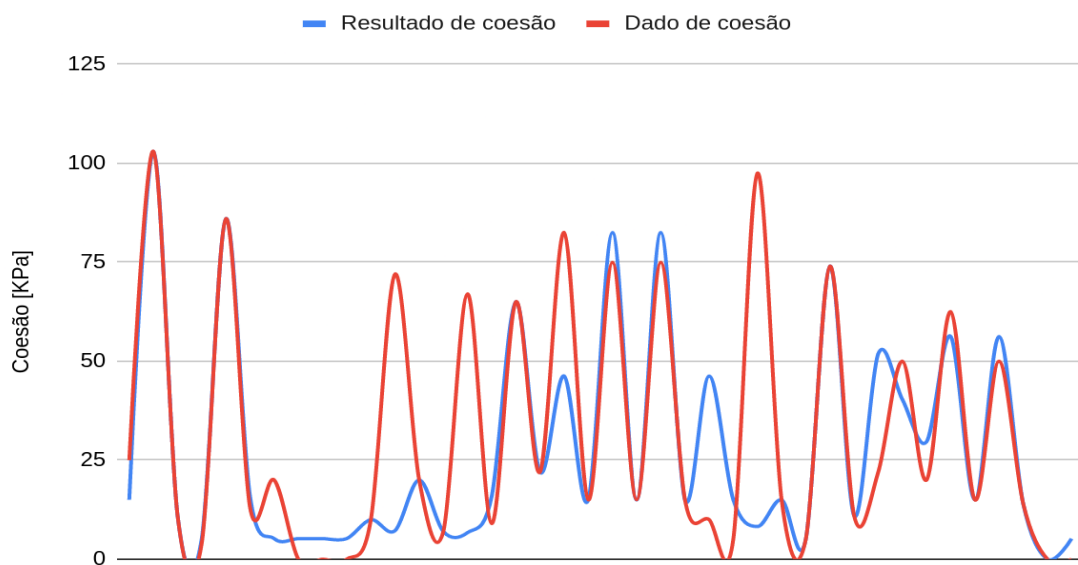
TABELA 7 - DADOS DE TREINO DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO

Parâmetros	Ângulo * [rad]	Areia	Cascalho	Finos	Compactado
		[%]	[%]	[%]	[m]
Min.	5	0.00	0.00	0.00	0.00
Máx.	50	95	95	100	100
Média	31.41	33.49	24.42	42.09	18.6
Mediana	32.00	15	20	30	0.00
Desvio padrão	7.08	33.2	25.3	37.4	39.4

Fonte: Elaborado pela autora. \*Ângulo de atrito interno

Os treinamentos das redes foram satisfatórios como vemos nas Figuras 28 e 29, a similaridade dos dados de treinamento com os dados resultantes, ou seja os dados gerados através da rede de treinamentos.

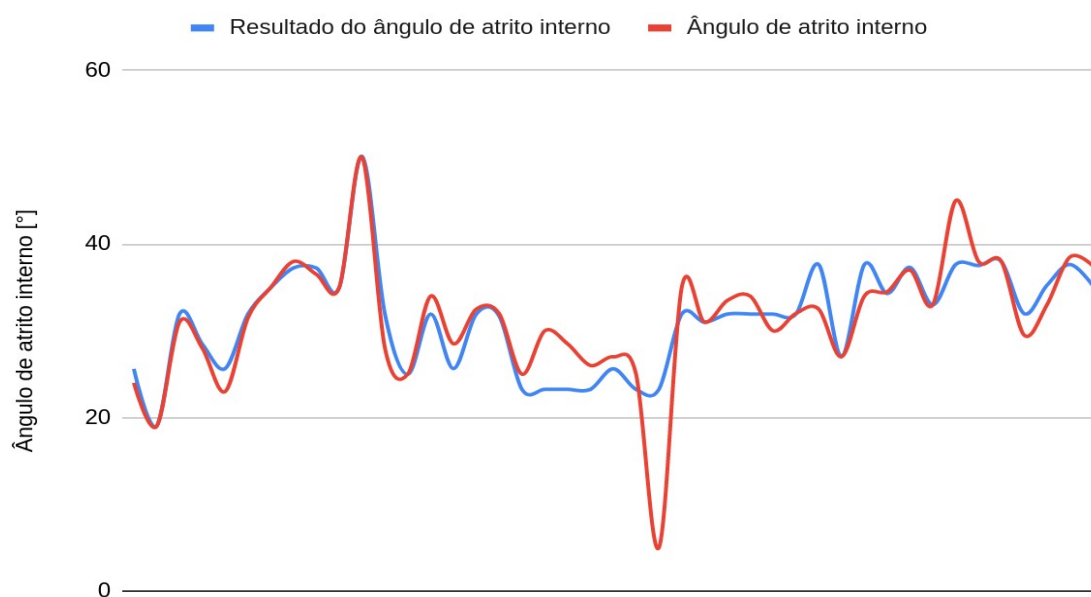
Figura 29: Rede Neural Artificial de coesão



Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 30: Rede Neural Artificial do ângulo de atrito interno



Fonte: Elaborado pela autora.

Entretanto, a pequena diferença dos resultados representado nas Figuras 28 e 29, faz com que os dados não tenham o *overfitting* da rede, que é quando uma rede gera muito bem os resultados de teste, entretanto, com uma base de dados de teste diferente dos dados de treinamento, a rede não consegue gerar resultados. Por isso, a rede precisa ser bem treinada para que os dados de teste sejam satisfatórios.

Para gerar os resultados através das redes treinadas, foi feita a Tabela 8 com os dados de teste, baseados na área de pesquisa, com os valores da Tabelas 3 e os dados das propriedades do solo como expostos no mapa pedológico (Mapa 5), juntamente com os pontos das áreas úmidas (Mapa 12). Entretanto assumiu-se que o solo não era compactado.

TABELA 8 - DOS DE TESTE DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO E COESÃO

<b>Parâmetros</b>	<b>Areia</b>	<b>Cascalho</b>	<b>Finos</b>	<b>Saturado</b>
	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[m]</b>
Min.	11	41	22	0.00
Máx.	19	63	39	100
Média	15.50	55.42	28.32	10.81
Mediana	15	63	29	100
Desvio padrão	2.18	8.93	6.92	0.313

Fonte: Elaborado pela autora. \*Ângulo de atrito interno

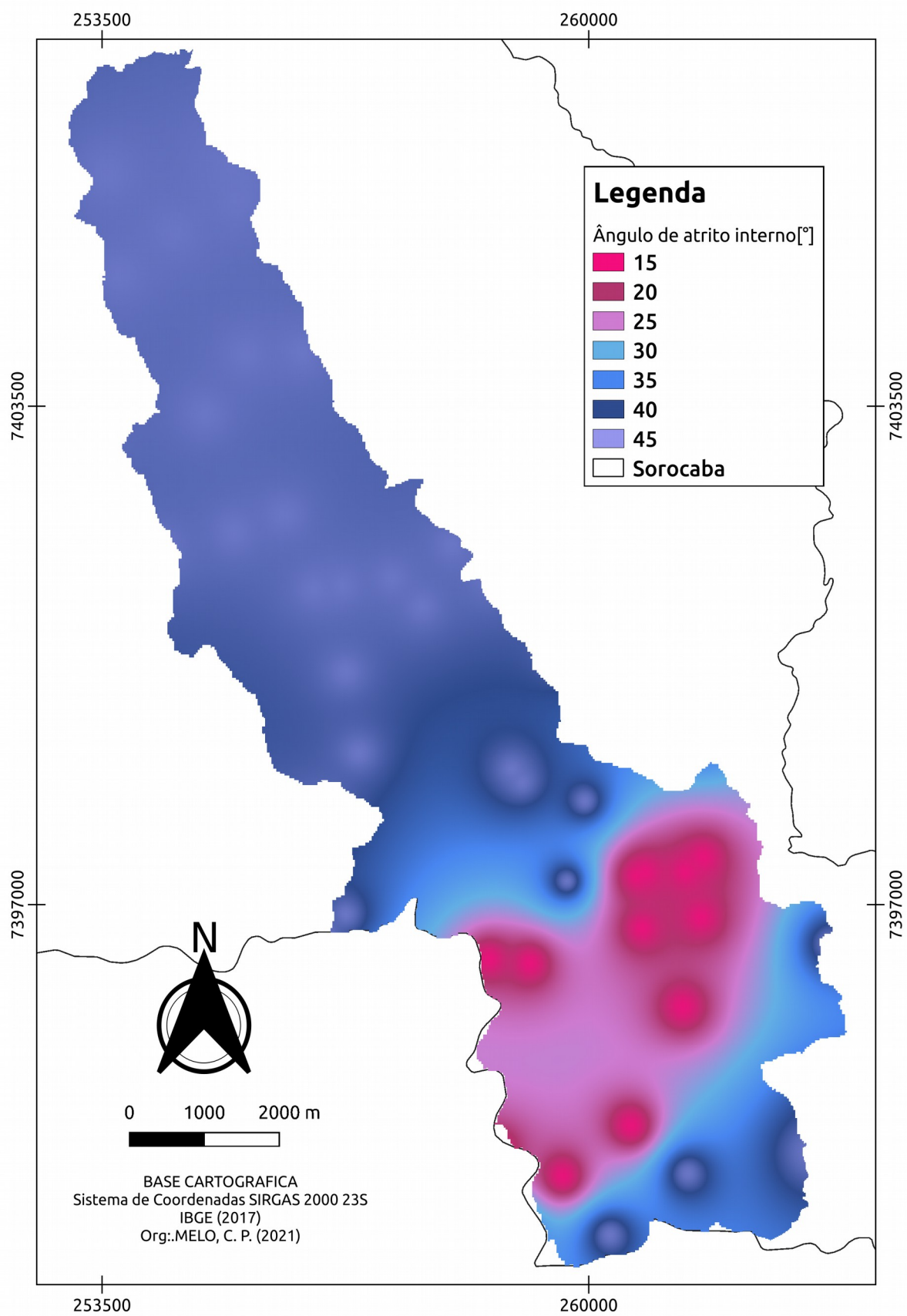
Ao obter os valores gerados pela rede neural, obtemos os seguintes dados de coesão e ângulo de atrito interno (Tabela 9) para gerar os Mapas 18 e 19.

TABELA 9 - RESULTADOS

<b>Parâmetros</b>	<b>Ângulo *</b>	<b>Coesão [MPa]</b>
Min.	15,96	5.19
Máx.	42,95	15,84
Média	37,10	13,60
Mediana	42,95	15,84
Desvio padrão	11.0	4,35

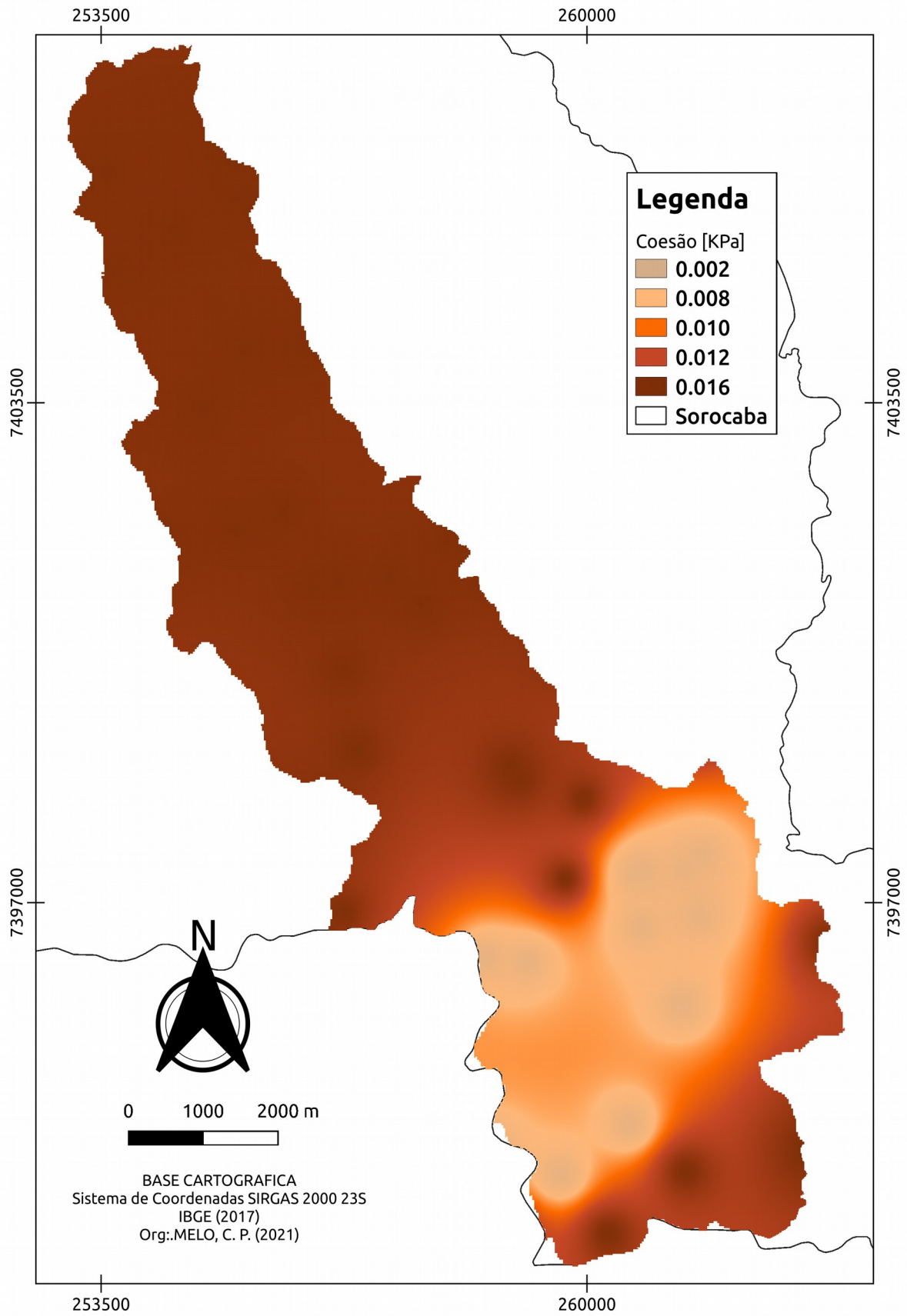
Fonte: Elaborado pela autora. \*Ângulo de atrito interno

Mapa 18: Ângulo de atrito interno



Fonte: Elaborado pela autora.

Mapa 19: Coesão



Fonte: Elaborado pela autora.

O erro percentual dos resultados obtidos pela RNA expostos na tabela 9, para a rede de coesão, foi um erro de 17,24 %, ou seja, 82, 75 % de acerto. Com a rede de ângulo de atrito interno o erro foi de 6.54 %, obtendo um valor de 93,46 % de acerto. Sendo o erro da rede de coesão, maior representado pela falta dos dados de compactação que a rede foi treinada.

#### 5.5 Suscetibilidade a escorregamentos, comparação entre os dados constantes e espacializados

Vemos nos Mapas 20 e 21, que a configuração apresentada por Listo e Carvalho Vieira (2010) são as mesmas encontradas na área de estudo, em que no início ou a montante da bacia se tem os locais de maior infiltração, aumentando as áreas de suscetibilidade de escorregamento, seguindo para áreas estáveis e incondicionalmente estáveis nas porções medial e terminal da bacia a sua jusante do Rio Pirajibú – Mirim, onde deságua no Rio Pirajibú. Para aplicação do modelo foi usado os parâmetros descritos na Tabela 10.

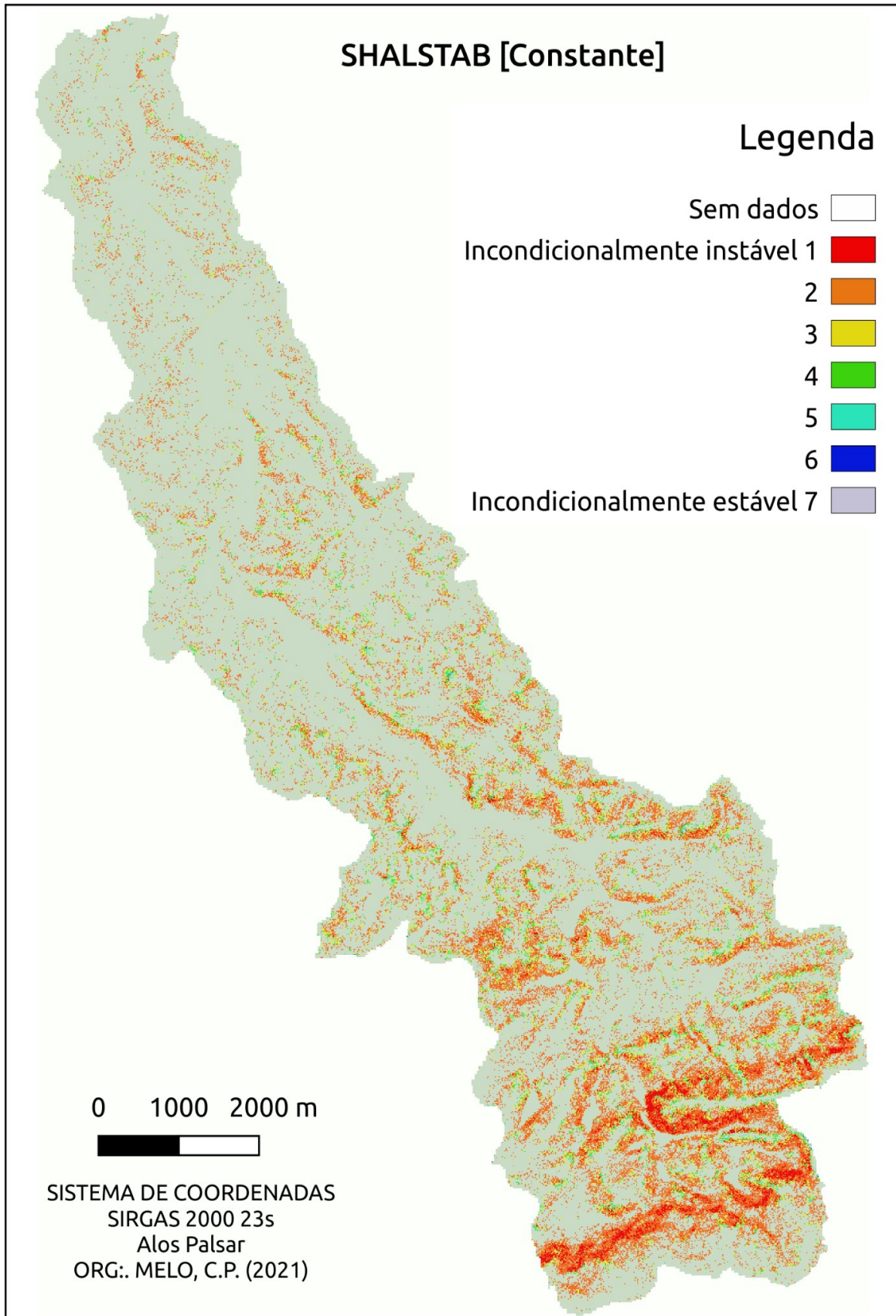
TABELA 10 – PARÂMETROS PARA APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB

<b>Parâmetros</b>	<b>Máx.</b>	<b>Min.</b>
Área de contribuição [m <sup>2</sup> ]	grid	grid
Declividade [rad.]	grid	grid
Densidade aparente do solo [g/cm <sup>3</sup> ]	1.14	2.50
Condutividade hidráulica [m/hr]	0.17	1.38
Espessura do solo[m]	1	
Ângulo de Fricção [graus]	25.1°	28.9°
Coesão ( <i>bulk cohesion</i> )[MPa]	0.194	0.23

Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo aplicada em duas versões, no Caso A (Mapa 20), foram usados os dados constantes como demonstrado na Tabela 6, e no Caso B (Mapa 21) os parâmetros foram todos espacializados.

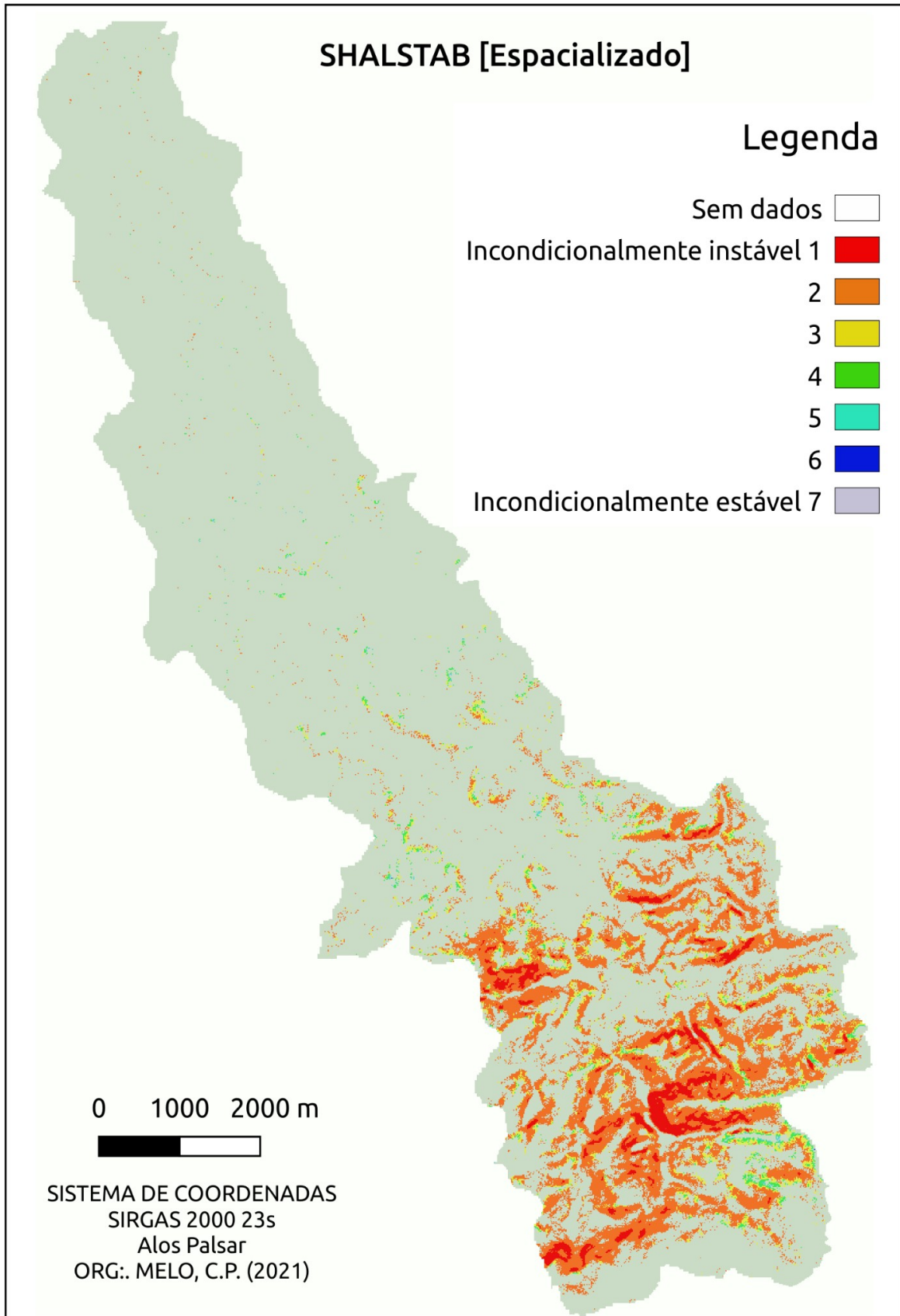
Mapa 20: Caso A



Fonte: Elaborado pela autora.



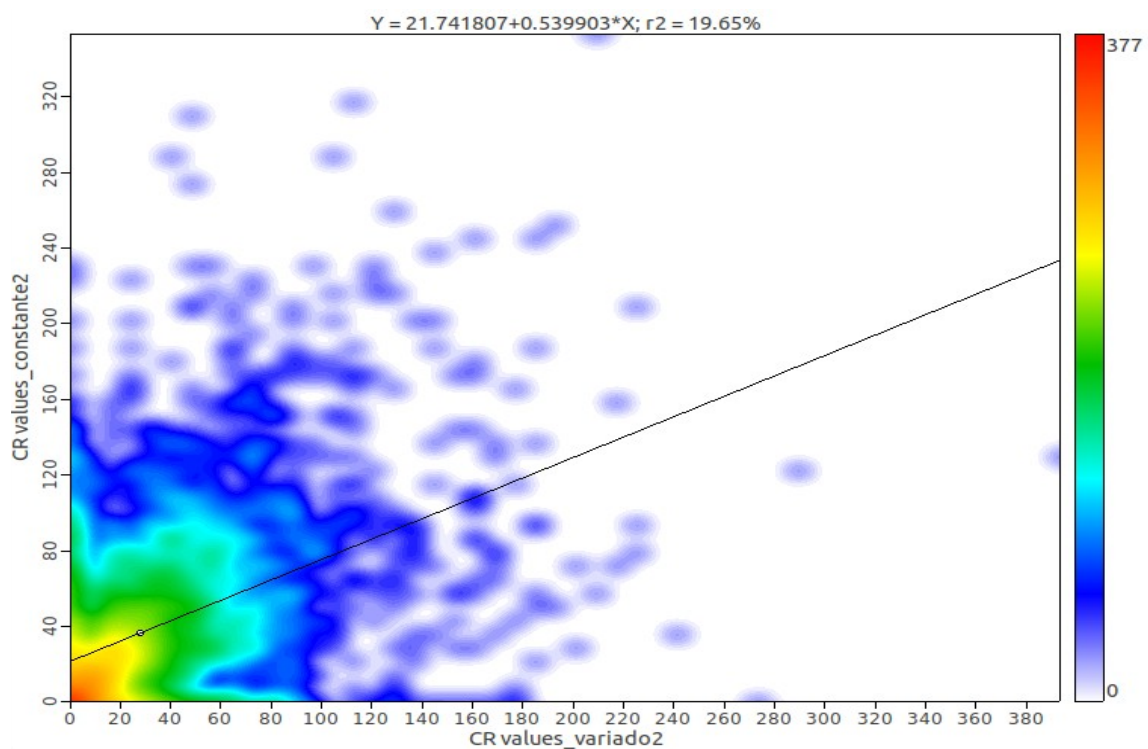
Mapa 21: Caso B



Fonte: Elaborado pela autora.

Notando que no caso A, onde os parâmetros são constantes, as áreas instáveis foram superestimadas em 31,94 % em relação ao caso B, isso considerando somente a classe 2 de alta instabilidade sendo que as áreas incondicionalmente instáveis, foram 0,08 % maiores no caso B. Os dois casos apresentam similaridades baixa de 19,65%, como vemos no gráfico de dispersão exposto na Figura 28, mesmo os parâmetros mantendo-se similares, a espacialização dos dados fez com que as áreas de risco fossem melhor identificadas e não superestimando as áreas de escorregamentos, conforme Sorbino, Sica e Cascini (2010).

*Figura 31: Relação entre o Caso A e B*



*Fonte: Elaborado pela autora.*

Através dos mapas conseguimos perceber que as áreas com alta susceptibilidade de escorregamentos ficam em áreas vegetadas, onde se situa a classe 1, mostrada no Mapa 13, caracterizada pelas áreas íngremes e de alta declividade, por exemplo o Bairro de Inhaíba que se localiza em uma área considerada como incondicionalmente instável nos dois casos (Mapa 20 e 21), e neste ponto tem-se o cultivo de Eucalipto, que tem a propriedade de absorver muita água do solo (DE VECHI E MAGALHAES JUNIOR, 2018), mantendo estas áreas estáveis a priori, mas gera uma tensão iônica na superfície do solo, dificultando a infiltração



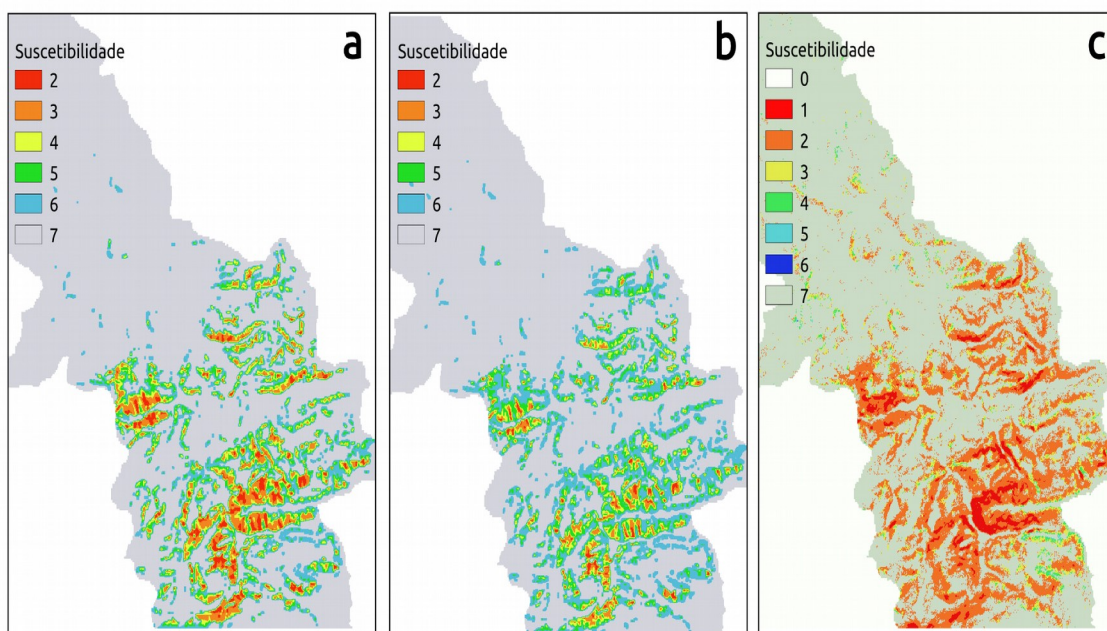
da água, aumentando o escoamento superficial e a possibilidade de erosão (OLIVEIRA, BRAGA E COSTA, 2018).

Notamos que com um maior número de amostras, para a RNA, as áreas incondicionalmente instáveis e estáveis, pontuadas pelo SHALSTAB poderiam ser melhor representadas. Em comparação com os dados gerados com a rede neural artificial e com os dados não especializados vimos que os resultados se diferem, tendo melhor resultado com a espacialização dos dados gerados pela rede neural e dos outros parâmetros.

### 5.5.1 Software GRASS GIS

Ao fazer a comparação entre os softwares, vemos que o programa GRASS foi preciso e pontual nas áreas suscetíveis a escorregamentos, pois tem somente uma entrada raster para cada parâmetro e tem valores que vão de incondicionalmente instável da classe 1 e estável da classe 7, sendo que os valores de 2 a 6 correspondem a áreas de chuvas críticas que podem levar ao escorregamento (URQUHART, 2018). Na Figura 29, observamos que ao considerarmos, para o grau de suscetibilidade, os valores máximos (Figura 29.a) e mínimos (Figura 29.b), estes não atingem todas as áreas pontuadas expostas na Figura 29.c.

Figura 32: A suscetibilidade aplicadas pelas ferramentas SHALSTAB e *r.shalstab*

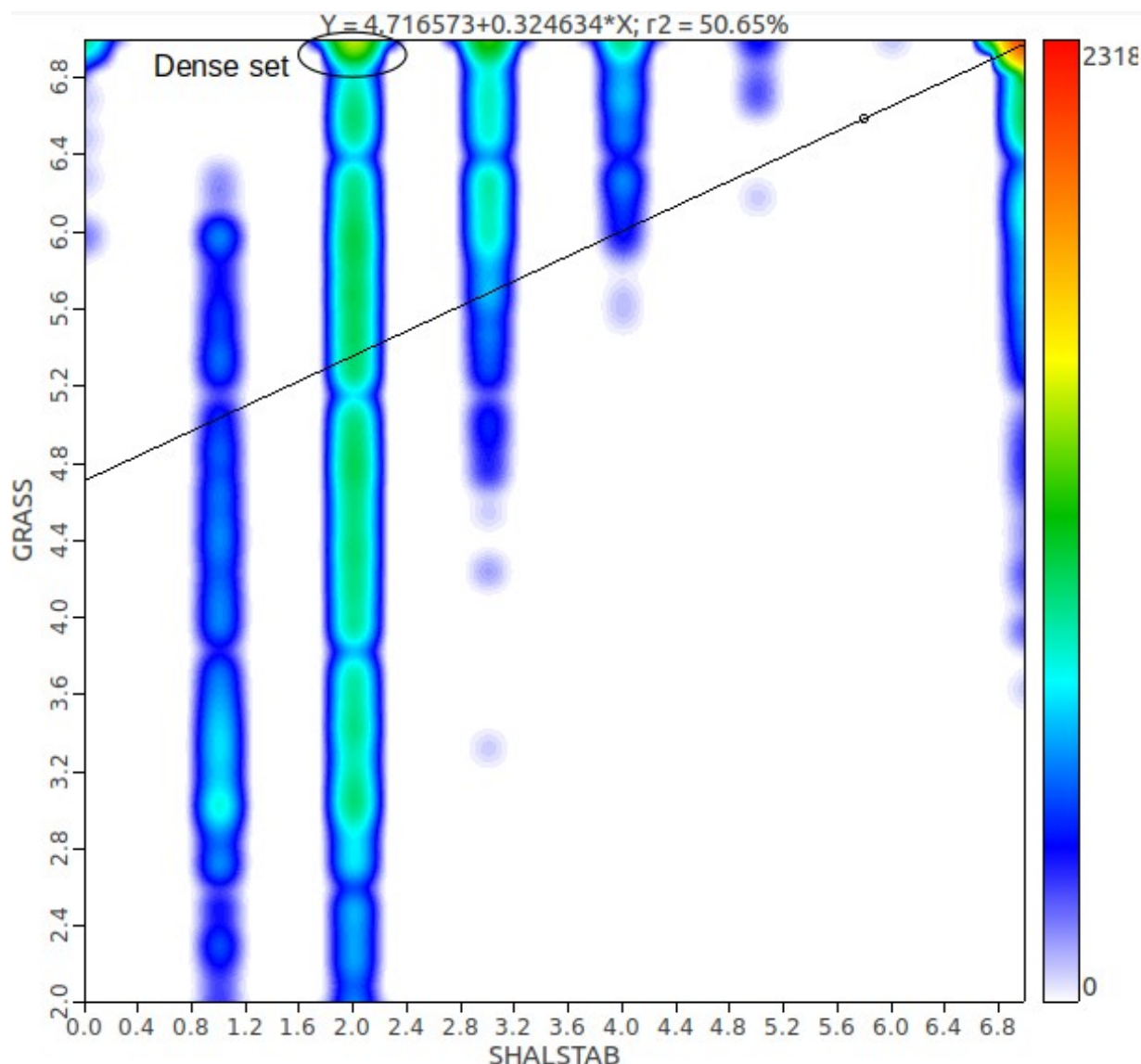


Fonte: Elaborado pela autora.

Entretanto, na legenda podemos notar que as áreas de suscetibilidade são as mesmas.

Na Figura 29.c, verifica-se, locais com grande densidade de pontos da classe 1, que apresenta uma maior homogeneidade, já na Figura 29.a no mesmo ponto vemos uma maior heterogeneidade possibilitando com isto maior identificação das classes. Entretanto vemos que ao aproximar do meio da bacia, a Figura 29.c. mostra maior identificação das áreas suscetíveis ao comparar com os outros dois mapas.

Figura 33: A relação entre suscetibilidade aplicada pelas ferramentas SHALSTAB e r.shalstab



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando o grau de similaridade entre as classes por mais que elas não sejam compatíveis apresentam uma similaridade de 50.65 % de relação, como notamos na Figura 30.

No geral os programas são funcionais e satisfatórios. Entretanto notamos (Figura 30) que a classe 2 mostrada no eixo x, usando a ferramenta SHALSTAB, aparece em todas as classes definidas pela ferramenta r.shalstab do GRASS (eixo y), ou seja, como se observa no local circulado (Figura 30), a densidade de pontos estáveis pelo GRASS é uma classe instável pelo SHALSTAB, podendo ser uma superestimativa ou uma baixa porcentagem nas áreas suscetíveis.

## 5.6 Análise AHP

Com os fatores analisados e consultadas várias referências, os valores foram colocados como exposto na Tabela 11.

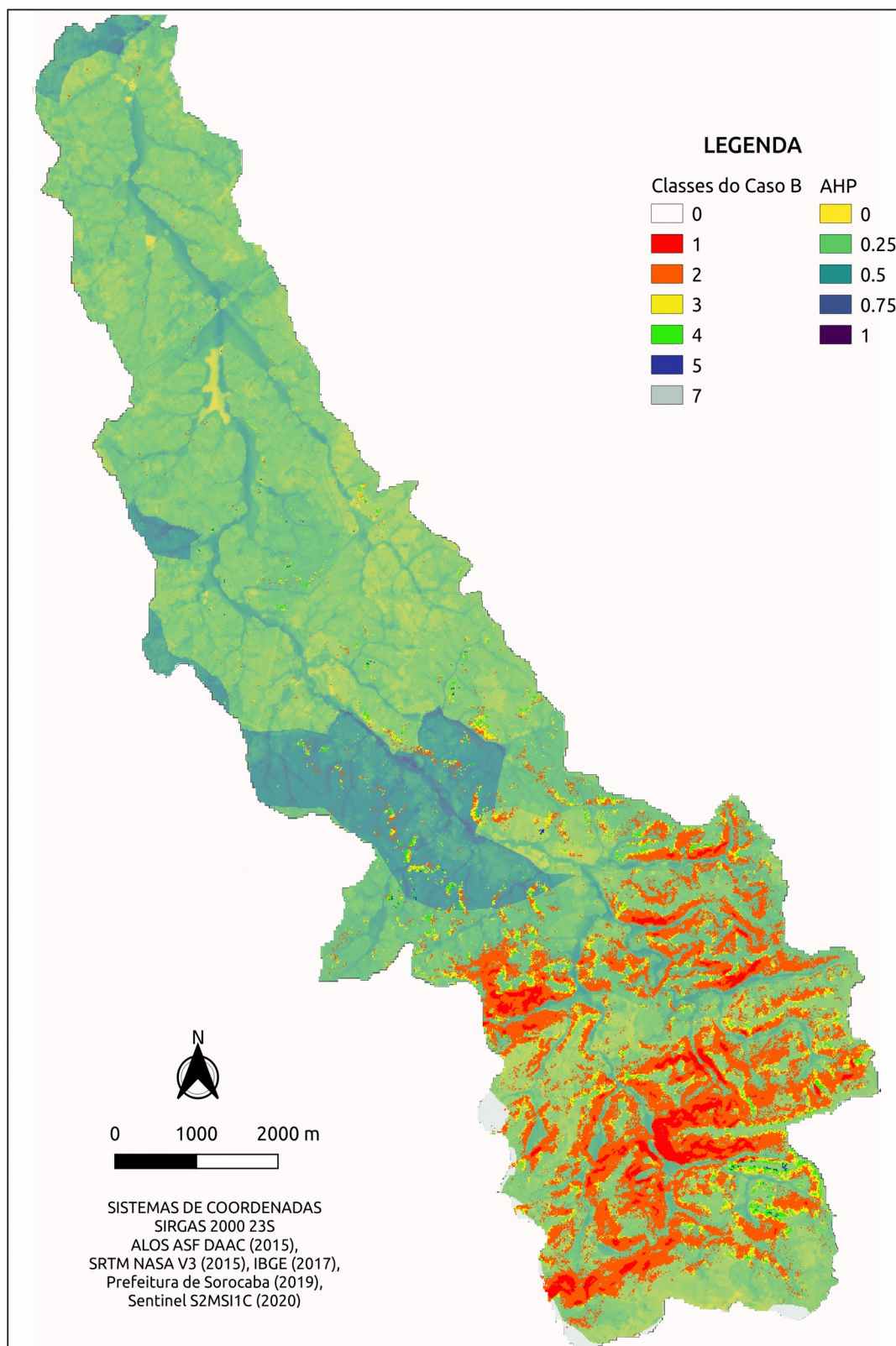
TABELA 11 - FATORES USADOS NA ANÁLISE AHP

<b>Fator de importância</b>	<b>Tipo de Terreno</b>	<b>Zonas</b>	<b>TWI</b>	<b>NDVI</b>
<b>Tipo de Terreno</b>	1	0,47	0,3	1
<b>Zonas</b>	2,1276596	1	1,29	2,37
<b>TWI</b>	3,3333333	0,7751938	1	1,27
<b>NDVI</b>	1	0,4219409	0,7874016	1

Fonte: Elaborado pela autora.

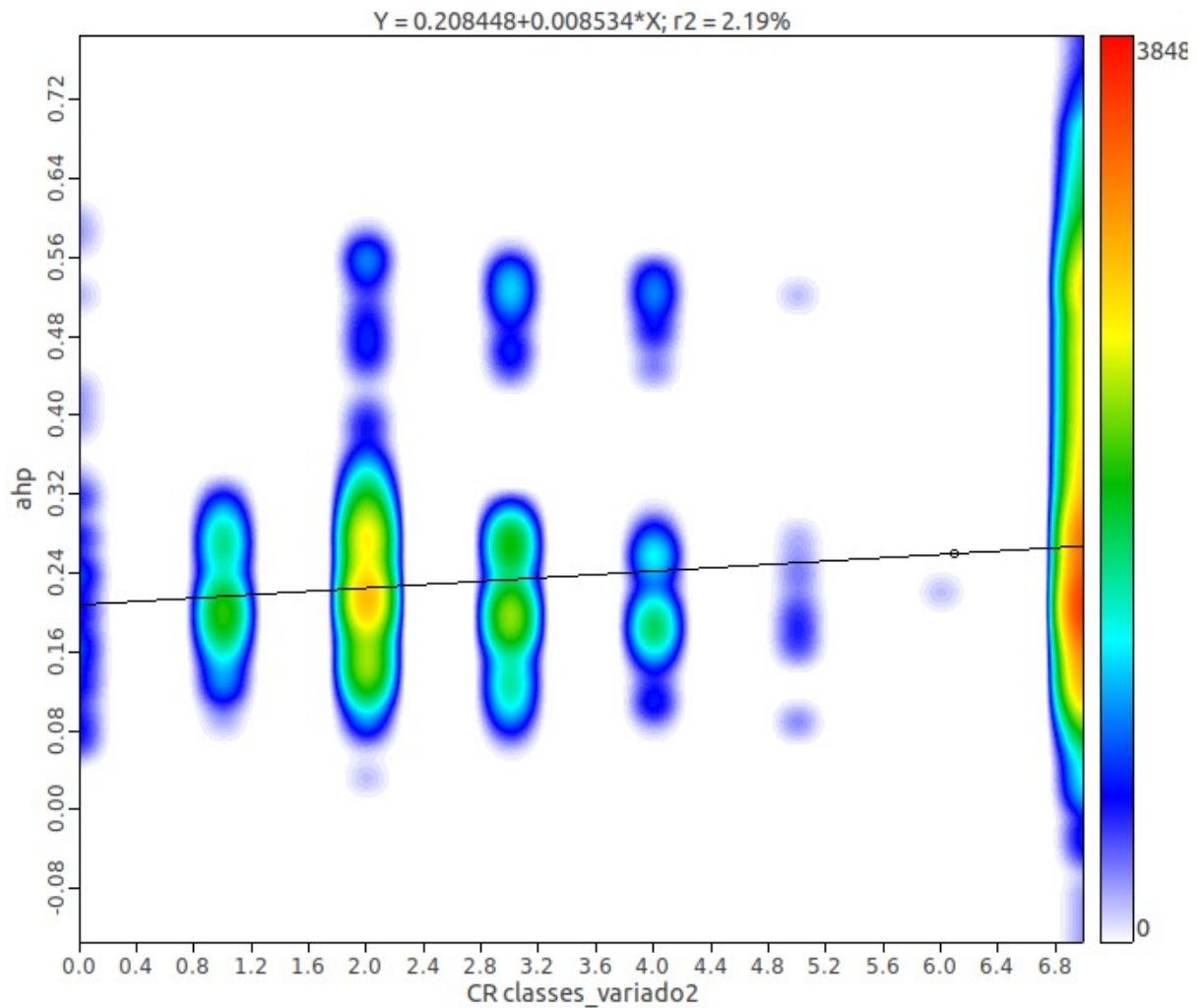
A partir dos fatores expostos na Tabela 11, foram calculados os pesos, normalizados para encontrar o índice de consistência e com isto analisar se a tabela proposta é consistente ou não. Foram feitos muitos testes de consistência para que alcançasse valores menores que 0,1 e comprovasse a consistência da hierarquia gerada.

Mapa 22: AHP



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34: Relação dos escorregamentos com a AHP



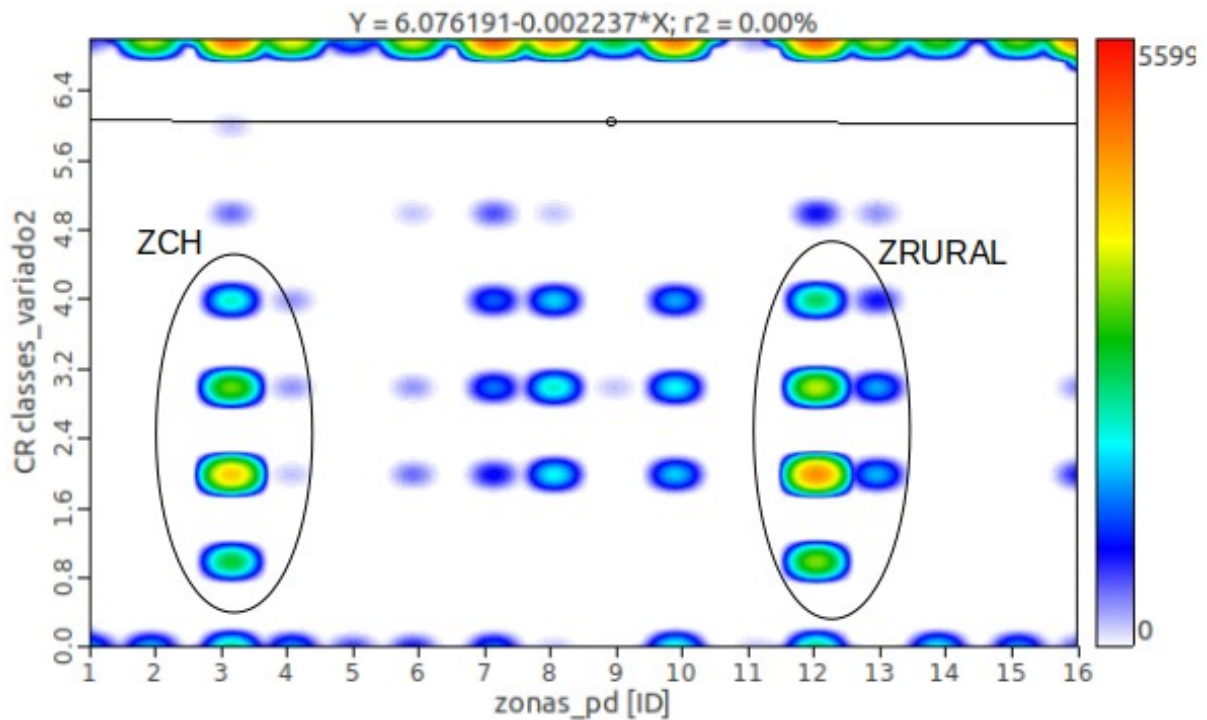
Fonte: Elaborado pela autora.

Com o CR satisfatório de 0.036425, podemos perceber que os locais que apresentam risco de susceptibilidade ao escorregamento pela urbanização, em azul escuro, apresentam valores maiores 0.50, exposto no Mapa 22, nestas áreas tem se alguns pontos de instabilidade apontadas pelo modelo SHALSTAB, entretanto são classes de instabilidade baixa.

Relacionado com os dados de suscetibilidade, verificou-se que as áreas suscetíveis a escorregamentos não estão nos locais de maior nível de urbanização, como mostra o gráfico de dispersão (Figura 31), observando a similaridade baixa de 2.19 %. Entretanto, ainda se tem os valores entre 0.45 - 0.57 da análise AHP no eixo y, que representa as áreas urbanas, mas a maior parte se encontra nas áreas de menor urbanização localizado nas classes 2 e 3 como vemos no eixo x nas classes de suscetibilidade (CR classes).



Figura 35: Relação das zonas com as classes de suscetibilidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar na Figura 32 onde estão localizados os pontos de instabilidade, dentre as zonas de uso do solo definidas pela Prefeitura dentro da bacia. Como também os pontos incondicionalmente estável representados pelos valores maiores que 6.8.

Pontuadas como áreas suscetíveis correspondem às ZRURAL e ZCH, que são indicadas como estáveis por serem áreas que apresentam cobertura vegetal. Os pontos de instabilidades são causados por ações antrópicas, como o aumento das concentrações de ocupações irregulares em áreas de relevo de declividade acentuada, nas depressões, nas várzeas dos rios, assinalando o aumento da probabilidade de desastres.

## 6. CONCLUSÕES

Considerando as questões iniciais colocadas, um dos fatores que condicionam a instabilidade da bacia e sua configuração, tais como áreas com maior declividade e altitude. A falta de infraestrutura nos Bairros Brigadeiro Tobias e Vila Astúrias também atuam para aumentar a instabilidade dos terrenos. Já na segunda questão, vimos que as áreas mais instáveis são aquelas cujos fatores condicionantes de escorregamentos estão localizados nas áreas de cabeceiras da bacia, mais afastadas dos bairros. Onde se tem fazendas e áreas consideravelmente preservadas, ou seja áreas de cultivo e matas, não se observam áreas de instabilidade, como por exemplo nas imediações do Inhaíba e Serra do São Francisco.

O objetivo geral da pesquisa foi encontrar as áreas de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos, aliado a este foi definido os objetivos específicos como o uso de software livre para aplicar o modelo SHALSTAB, encontrando neste uma boa ferramenta para a aplicação do modelo. Entretanto quanto melhor a qualidade dos dados relevantes para a área de estudo, melhor os resultados, pois cada área e análise requer um tipo de material específico. Notou-se também que o software pode melhorar consideravelmente a qualidade dos dados dependendo de como foi replicada a fórmula proposta por Montgomery e Dietrich. A técnica AHP foi um bom caminho para análise das áreas urbanas, tentando ao máximo não usar os pesos de forma pessoal, mas sim obtendo a partir dos fatores, pois é necessário ter bons pesos para que o autor não interfira nos resultados.

A RNA, a princípio, não era um objetivo definido no início da pesquisa, entretanto com excepcional situação da pandemia, os laboratórios fechados ou parcialmente funcionando, esta técnica escolhida foi o melhor caminho. Os resultados se mostraram bastante satisfatórios, entretanto, necessidade de melhorias nos dados de entrada com maior análise em campo e testes laboratoriais e com maior lista de dados de treinamento, pode-se obter melhores resultados. A metodologia utilizada demonstrou-se satisfatória a ser aplicada em diversas áreas geográficas, bem como em diversas questões no campo geral do conhecimento. Podendo se ter possíveis medidas de planejamento que as autoridades locais podem realizar na infraestrutura e na disseminação do conhecimento do risco para as comunidades que vivem nestes localidades.

## 9. REFERÊNCIAS

AL-HAMED S. A., WAHBY M. F., ABOUKARINA A. M. Artificial neural network for soil cohesion and soil internal friction angle prediction from soil physical properties data. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science** (ISSN: 2251-0044) Vol. 4(5) pp. 85-94, June, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.14303/irjas.2014.035>

ANA – Agência Nacional de Águas (ANA), **HIDROWEB**, [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br), acessado em outubro de 2020.

ADLER, F. R. TANNER, C. J. **Ecosistemas urbanos: princípios ecológicos para o ambiente construído**. Edição 1: Oficina de Texto, 2015 pg 384.

ANGLE OF FRICTION. Geotech Data, 2013-2021. Disponível em: <http://geotechdata.info/parameter/angle-of-friction>. Acesso em: 21/05/2021.

ALHEIROS, M. M. *et al.* **Manual de Ocupação dos Morros da Região Metropolitana de Recife**, Recife- PE, Brasil (2003).

ARONICA, G. J. *et al.* Assessment and mapping of debris-flow risk in a small catchment in eastern Sicily through integrated numerical simulations and GIS, **Physics and Chemistry of the Earth**, Volume 49, 2012, Pages 52-63. <<https://doi.org/10.1016/j.pce.2012.04.002>>

ASTM D2488 – 09a Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure) 1, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM D3080 - 04 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, [www.astm.org](http://www.astm.org).

BAUM, R., SAVAGE, W. e GODT, J.: TRIRS – a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis, **US Geological Survey Open-file Report**, 424, 61, 2002.

BAUMANN, V. BONADONNA, C. CUOMO, S. MOSCARIELLO, M. MANZELLA, I. Slope stability models for rainfall-induced lahars during long-lasting eruptions. **Volgeo** (2018), doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.06.018

BEAUDETTE, D.E., ROUDIER P., O'GEEN, A.T. **Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for soil scientist**, *Computers & Geosciences* 52 (2013) p.258–268.

BERTRAND, G. **Paisagem e Geografia Física global: um esboço metodológico**. Caderno de Ciências da Terra. N.13. São Paulo. IG USP. 1972. 27p.



BERTRAND, G. **Construire la géographie physique**. Hérodote, Paris, n. 26, 1982.

BEVEN, K. J. e KIRKBY, M. J.(1979) A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, 24, 43-69. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>

BIELSCHOWSKY C., BARBOSA A. C., ALVES L. E JUNIOR G. C. S. Determinação da condutividade hidráulica saturada de campo em solos com diferentes texturas utilizando o método do Permeâmetro IAC **Caderno de Estudos Geoambientais – CADEGEO** v.03, n.01, p.44-55, 2012.

BLASCHKE, T. e DRÂGUT, L. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**. Volume 81, Issues 3– 4, 29 November 2006, Pages 33

BRAGA, F. V. A. **Estimativa dos parâmetros da resistência do solo ao cisalhamento através de pedotransferência**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria em Julho de 2014.

IBGE, Perfil dos Municípios Brasileiros, 2017. <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/saude/10586-pesquisa-de-informacoes-basicas-municipais.html?=&t=downloads>>

IBGE, Perfil dos Municípios Brasileiros, 2018. <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/saude/10586-pesquisa-de-informacoes-basicas-municipais.html?=&t=downloads>>

IBGE, Perfil dos Municípios Brasileiros, 2019. <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/saude/10586-pesquisa-de-informacoes-basicas-municipais.html?=&t=downloads>>

IBGE, Perfil dos Municípios Brasileiros, 2020. <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/saude/10586-pesquisa-de-informacoes-basicas-municipais.html?=&t=downloads>>

IBGE, Censo agropecuário 1996. Rio de Janeiro: **IBGE**, 1996. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>.

BOEHNER, J. *et al* (2002): **Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation**. In: Micheli, E., Nachtergaele, F., Montanarella, L. [Ed.]: Soil Classification 2001. European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxembourg. pp.213-222.

BOEHNER, J. e SELIGE, T. (2006): **Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation**. In: Boehner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. [Ed.]: SAGA - Analysis and Modelling Applications, Goettinger Geographische Abhandlungen, Goettingen: 13-28.

CANIL, K. ENANPUR - Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional Ed XVIII. **Cartas Geotécnicas** de Aptidão à Urbanização aplicada ao Planejamento Territorial, 2017

CASAGRANDE, A. (1948) **Classification and Identification of Soils**. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113, 901-930.

CARTER M. e BENTLEY S. **Correlations of Soil Properties**. Pentech Press Ltd., 1991. 130 pg. ISBN: 978-0727303172.

CAROU, C. B. Inventário dos escorregamentos da Bacia do Rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP) **Revista do Departamento de Geografia da USP** em 2017 pg 172-179. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.133377>

CHOLLET, F., e ALLAIRE, J. J. (2018). **Deep Learning with R** New York, NY: Manning.

CHORLEY, R. J., 1957, **Illustrating the laws of morphometry**: Geol. Mag ., v. 94, p. 140-149

CHORLEY, R. J. **Models in Geomorphology**. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). Models in Geography . Londres: Methuen & Co., 1967. p. 43-96.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979.

COELHO-NETTO, A. L, AVELAR, A. S, FERNANDES, M. C. e LACERDA, W. A. 2007. "Landslide Susceptibility in a Mountainous Geocosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The Role of Morphometric Subdivision of the Terrain". **Geomorphology** 87(3):120–31.

COHESION. Geotech Data, 2013-2021. Disponível em:<http://geotechdata.info/parameter/cohesion>. Acesso em: 21/05/2021.

COUTO, B. O. C. PEREIRA, E. L. GOMES, R. C. FERREIRA, L. D. Correlação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone de queda livre para diferentes materiais. **COBRAMSEG** 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil ABMS.

CULLING, W. E. H. Multicycle stream and the equilibrium theory of grade. **Journal of Geology**, 65, 1957, p 259 - 274

CRUDEN, D. M. E D.J. VARNES, D. J. (1996) **Landslide types and processes**. In: Turner AK, Schuster RL(eds) Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247, Washington, DC, Chapter 3, pp. 36

CRUZ FLORES, *et al.* (2020). **Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba / Spatial and temporal variations in Normalized Difference Vegetation Index in Cuba..** 29. 10.7818/ECOS.1885.

CORRÊA, P. C., TONELLO, K. e FRANCO, F. (2016). Análise hidroambiental da microbacia do Pirajibu-Mirim, Sorocaba, SP, Brasil. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. 11. 943. 10.4136/ambi-agua.1969.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Estudo de Águas Subterrâneas - Região Administrativa 4 - Sorocaba. São Paulo: **DAEE**, 1982. 2 v.

DE VECHI, A.; MAGALHÃES JÚNIOR, C. A. O. orientação de vertentes positivas e negativas da cultura do Eucalipto e os efeitos ambientais do seu cultivo. **Revista Valore**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 495-507, jun. 2018. ISSN 2526-043X. Disponível em: <<https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/101/117>>. Acesso em: 15 jul. 2021. doi:<https://doi.org/10.22408/rev312018101495-507>.

DIETRICH, W. E., REISS, R., HSU, M.-L., AND MONTGOMERY, D.R. A Process- Based Model for Colluvium Soil Depth and Shallow Landsliding Using Digital Elevation Data. **Hydrological Processes** , 9, 383-400, 1995.

DIETRICH, W. E., BELLUGI, D. e ASUA R. R., Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for Forest Management. Land Use and Watersheds: Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas Water Science and Application Volume 2, pages 195-227 Copyright 2001 by the **American Geophysical Union**.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. Shalstab: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Cary, NC: **NCASI** , 1998. Technical Report.

DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHROTT, L. e IBSEN, M.-L. **Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes**. Wiley & Sons , Chichester. (Eds.) 1996.

DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: RAPER, J. (Ed.). Three-dimensional applications in geographic information systems. New York: **Taylor and Francis**, p.51-77, 1989.

DIKAU, R. Geomorphic Landform Modelling based on hierarchy theory. Presented at Proceedings of the **4th International Symposium on Spatial Data Handling** 23 -27 Julho,1990 in Zurich Vol.1 p 230-239.

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. 1991. Landform Classification of New Mexico by Computer. Open File report 91-634. U.S. **Geological Survey**.

DRAGUT, L. BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, 81 (2006), pp. 330-344

DOBOS, E. MICHELI, E. BAUMGARDNER, M.F. BIEHL, L. HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping, 2000. **Geoderma** 97 p 367 - 391

EARLE, S. (2015 -9). **Physical Geology**. Victoria, B.C.: BC campus. Retrieved from <https://opentextbc.ca/geology/>

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analysis. **Groundwater Monitoring Review**. v.9, 1989. p.184-193

EISANK, C. DRÂGUT, L. e BLASCHKE, T. A generic procedure for semantics-oriented landform classification using object-based image analysis. **Geomorphometry**. Volume 2011, p 125-128

ENGELEN FE DIJKSHOORN, **SOTER database for Soil Erosion Assessment with an example for a pilot area in South America, Year 1991**. [https://www.isric.org/sites/default/files/isric\\_report\\_1991\\_08.pdf](https://www.isric.org/sites/default/files/isric_report_1991_08.pdf)

ENGELEN, V.W.P. van e DIJKSHOORN, J.A. (eds.), 2013. Global and National Soils and Terrain Databases (SOTER). Procedures Manual, Version 2.0, **ISRIC – World Soil Information**, Wageningen. 198 pages

FERNANDES, N. F. *et al.* Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: Field evidence and modeling. **Catena** , 55, 2, 163-181, 2004.

FERNANDES, J. A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim, RS**. 2011. 127f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil apresentada ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, 2011.

FERNANDES F. N. **Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios**. Espaço Aberto 2016 , PPGG - UFRJ, V. 6, N.1, p. 209-247, 2016 ISSN 2237- 3071

FLORENCE, W.Y. K, FRANKIE L.C. L. From landslide susceptibility to landslide frequency: A territory-wide study in Hong Kong, **Engineering Geology**, Volume 242, 2018, Pages 12-22, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.001>.

Manual de Design de Fundação e Estruturas de Terra do Comando de Engenharia de Instalações Navais. Foundations & Earth Structures. **U.S. Government Printing Office**. Command 200 Stovall Street Alexandria, Virginia.1988, [https://web.mst.edu/~rogersda1988/umrcourses/ge441/DM7\\_02.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda1988/umrcourses/ge441/DM7_02.pdf)

GALSTER, R. W. **Engineering Geology in Washington**, BULLETIN 78, 1989. Centennial Volume Committee Washington State Section, Association of Engineering Geologists. Washington Division of Geology and Earth Resources. [https://www.dnr.wa.gov/publications/ger\\_b78\\_engineering\\_geol\\_v1\\_pt1of5.pdf](https://www.dnr.wa.gov/publications/ger_b78_engineering_geol_v1_pt1of5.pdf)

GODOY, L. **Aplicação do Modelo SHALSTAB no mapeamento de áreas suscetíveis a ocorrências de movimento de massa, na Bacia do Rio Marumbi, Serra do Mar, Paraná**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em 2015.

GOMES, M. C. V.; VIEIRA, B.C. Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, v. 60, p. 53-65, 2016.

GOMES, R.A.T., GUIMARÃES, R.F., CARVALHO, O.A. *et al*. Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with an empirical model of debris flow. *Nat Hazards* 45, 197 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9160-z>

GORSERVSKI, P. V. GESSLER, P. E. BOLL, J. ELLIOT, W.J. FOLTZ, R.B. Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. *Geomorphology* 80 (2006) 178 – 198

GOKTEPE, A.B., ALTUN, S., ALTINTAS, G., TAN O. Shear strength estimation of plastic clays with statistical and neural approaches. *Journal of Building and Environment*, v.43, 849-860, 2008.

GUIDICINI E NIEBLE **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora da USP, 1984, p. 216

GUIMARÃES, R. F. Fundamentação Teórica do Modelo Matemático para Previsão de escorregamentos Rasos Shallow Stability, *Espaço & Geografia*, Vol.6, No 2 (2003), 133:150 ISSN: 1516-9375

GUIMARÃES, R. F. *et al*. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. *Revista Brasileira de Geociências* , v. 39, p. 192-200, 2009.

GUIMARÃES R. F. *et al*. Determination of Areas Susceptible to Landsliding Using Spatial

Patterns of Rainfall from Tropical Rainfall Measuring Mission Data, Rio de Janeiro, Brasil. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2017,6, 289; doi:10.3390/ijgi6100289 [www.mdpi.com/journal/ijgi](http://www.mdpi.com/journal/ijgi)

HACK, J.T. 1960 Interpretation of erosional topography in humid temperate regions. *American Journal of Science* . Bradley V. 258 p. 80- 97.

HAMMOND, E. H. **Small scale continental landforms map.** Ann.Ass. Am Geogr.1954 p. 33-42

HAMMOND, E.H. Analysis of Properties in Land Form Geography: An Application to Broad-Scale Land Form Mapping. Annals of the Association of American Geographers. **Wiley Online Library**-1964 < <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1964.tb00470.x>>

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Models, paradigms and the new Geography. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). **Models in Geography.** Londres: Methuen e Co.,1967. p. 19-41.

HENDRICKS , M.R. (2010) – **Introduction to Physical Hydrology.** Oxford University Press, Oxford,UK, 331pp.

HUANG, J. KAO, S. H, M. LIN, J. Stochastic procedure to extract and to integrate landslide susceptibility maps: an example of mountainous watershed in Taiwan. **Natural Hazards and Earth System Science**, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2006, 6 (5), pp.803-815. fhal-00299366f

HUNGH , O. LEROUEIL, S. PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Springer-Verlag** Berlin Heidelberg 2013. DOI 10.1007/s10346-013-0436-y

HUTCHINSON, J. N. (1968) Mass movement. In: Fairbridge RW (ed) Encyclopedia of geomorphology. **Reinhold Publishers**, New York, pp 688

HUTCHINSON, J.N. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: **Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides**, Lausanne, 1:3 IN (1988)

OLIVEIRA *et al.* Mapa Pedológico do Estado de São Paulo. Campinas: IAC/Embrapa, 1999. Mapa, escala 1:500.000. <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/>

INSTITUTO GEOLÓGICO - IG . Mapeamento de áreas de risco a escorregamento e inundação - Termo de **Cooperação Técnica IG-CEDEC** . De novembro de 2004.Disponível:<[http://www.sidec.sp.gov.br/producao/map\\_risco/uploads/doc1350327277.pdf](http://www.sidec.sp.gov.br/producao/map_risco/uploads/doc1350327277.pdf)>.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa

Geológico do Estado de São Paulo: Escala 1: 500.000. **São Paulo: IPT**, 1981a. 2v. (IPT Monografias, 6, Publicação, 1184).

INTRATOR, O. and INTRATOR, N. (2001) Interpreting Neural-Network Results: A Simulation Study. *Computational Statistics & Data Analysis*, 37, 373-393. [https://doi.org/10.1016/S0167-9473\(01\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(01)00016-0)

IRIGARAY, C., LAMAS, F., HAMDOUNI, R., CASTILLO, T. e CHACÓN, J. (2000). The Importance of the Precipitation and the Susceptibility of the Slopes for the Triggering of Landslides Along the Roads. **Natural Hazards**. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 21. 65-81. 10.1023/A:1008126113789.

IWAHASHI, J. KAMIYA, J. I. MASASHI, M. and DAI Y. Global terrain classification using 280 m DEMs: segmentation, clustering, and reclassification. **SpringerOpen - Progressing Earth and Planetary Science** (2018). Disponível: <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0173-x>.

IWAHASHI, J. e PIKE, R. J. 2007. “Automated Classifications of Topography from DEMs by an Unsupervised Nested-Means Algorithm and a Three- Part Geometric Signature”. **Geomorphology** 86 (3–4): 409–40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>.

IYEKE, B. N., ANTWI-ASARE, T. O., GOCKEL, A. F., e ABBEY, E. N. (2016). The linkages between financial deepening, trade openness, and economic growth in the west african economic and monetary union (waemu). **African Finance Journal**, 18 (2), 93–116.

JASIEWIZ, J. e STEPINSKIA, T. F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology** - Volume 182, 15 January 2013, Pages 147-156

JOHNSON, K. A. e SITAR, N. Significance of transient pore pressures and slope conditions in debris flow initiation. **International Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineer** 12th, 1989. Rio de Janeiro: Rotterdam, A. A. Balkema V 2, p 1619 - 1622

KIRAN, S. & LAL, B. (2016). Modelling of soil shear strength using neural network approach. **CAFET-INNOVA TECHNICAL SOCIETY**. ISSN 0974-5904 21. 3751-3771.

KLINGEBIEL, A. A. HORVATH, E. H. MOORE, D. G. REYBOLD, W. U. Use of Slope, Aspect, and Elevation Maps Derived from Digital Elevation Model Data in Making Soil Surveys. In: REYBOLD, W. U. e PETERSEN G. W. **Soil Survey Techniques**, Volume 20, 1987.

LABUZ, J. F. ZANG, A. Mohr–Coulomb Failure Criterion. **Springer-Verlag**, Rock Mech Rock Eng (2012) 45:975–979 DOI 10.1007/s00603-012-0281-7

LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos 2ª Edição São Paulo: **Oficina de Textos**,

2002. ISBN 978-85-86238-58-1.

LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos **Oficina de Texto** 2a ed. 2010 p. 216. ISBN: 978-85-7975-008-3.

LIMA , J. P. Hidrologia urbana – Conceitos básicos. Lisboa, Junho de 2010; Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos **Universidade de Coimbra**.ISBN:978- 989-8360-03-8

LISTO, F.L.R. CARVALHO VIEIRA, B. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology** 169–170 (2012) 30–44

LISTO, F.L.R. CARVALHO VIEIRA, B. Análise de Condicionantes Topográficos como Subsídio para Avaliação de Áreas de Risco a escorregamentos Rasos **Revista de Geografia**, v. esp, 2010

LISTO, F.L.R, Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP(SP) **Dissertação de Mestrado** apresentada ao Departamento de Geografia da USP em 2011.

LISTO , F. L. R.,RAMOS H. e VIEIRA B. C. Uso dos Modelos SHALSTAB e TRIGRS na previsão de escorregamentos translacionais. **Revista do Departamento de Geografia - USP**. September 2016

LISTO, F. Modelos matemáticos aplicados é previsão de escorregamentos translacionais rasos: Exemplos em áreas naturais e de risco. **Clio Arqueológica**. 2016 pg .91 - 114. ISSN: 2448-2331, DOI: <https://doi.org/10.20891/clio.V31N3p91-114>.

MACHADO, P.J.O., e TORRES, F.T.P. Introdução à hidrogeografia. São Paulo: **Cengage Learning** (2013),p, 192. ISBN-13: 9788522112678.

MALEY, T. Exploring Idaho Geology. Boise,1987. ID: **Mineral Land Publications** . Disponível em <https://imnh.iri.isu.edu/digitalatlas/geo/basics/geology.htm>.

MAYS, L. W. Water Resources Engineering. **John Wiley & Sons Inc**, 2005 New York, United States. p 860.

MAY, J. L. *et al.* 2020. NDVI Changes Show Warming Increases the Length of the Green Season at Tundra Communities in Northern Alaska: A Fine-Scale Analysis. **Frontiers in plant science**, 11, 1174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01174>

MAYBECK, M, GREEN P, VOROSMARTY, C. A new typology for mountains and other relief classes: an application to global continental water resources and population distribution.



**Mountain Research and Development**, 21(1):34-45 (2001). [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2001\)021\[0034:ANTFMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2001)021[0034:ANTFMA]2.0.CO;2)

MARQUES, J. D. O. *et al.* 2008. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

MARQUES ESPINHA, J. *et al.* Avaliação in situ da condutividade hidráulica de solos de montanha: un caso de estudo na Serra da Estrela (Centro de Portugal) **Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña**. 2009. Vol. 34, pp. 143 - 164. <<https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/8364/CA%2034%202009%20art%209.pdf>>

MARTINS, T.D. e OKA-FIORI *et al.* Assessment of Lidar-derived DTMs for landslide susceptibility mapping: Application in the Brazilian subtropical forest. **Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice** – Aversa *et al.* Eds. 2016. Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy, ISBN 978-1-138-02988-0

MCBRATNEY, A. *et al.* (2000). An Overview of Pedometric Techniques for Use in Soil Survey. **Geoderma**. 97. 293-327. 10.1016/S0016-7061(00)00043-4.

MCCULLOCH, W. S., PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biophysics** 5, 115–133 (1943). <https://doi.org/10.1007/BF02478259>

MCKENZIE, N.J.; GESSLER, P.E.; RYAN, P.J.; O'CONNELL, D.A. The role of terrain analysis in soil mapping. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Ed.). *Terrain analysis: principles and applications*. New York: **Wiley & Sons**, 2000, p. 245-265

MELO C. M. e KOBIYAMA M. Aplicação do Modelo Shalstab no Estudo de escorregamentos no Brasil: Revisão. **Rev. Bras. Geomorfol.** (Online), São Paulo, v.19, n.4, (Out-Dez) p.721-738, 2018.

MELO, R. S. R. A. Modelação de escorregamentos superficiais e escoadas de detritos com métodos estatísticos e determinísticos. **Tese de Doutorado**. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa de 2018.

MELO, C. P. e FERNANDES, E. **ENANPEGE - Encontro Nacional de Pós-Graduação em Geografia: Análise de atributos morfométricos de vertentes em relação às ocorrências de escorregamento de terra e inundações, na bacia hidrográfica do Rio Sorocaba, São Paulo. 2018** Ed. XIII. Disponível em: [https://www.enanpege2019.anpege.ggf.br/resources/anais/8/1562640763\\_ARQUIVO\\_1.Analiseatributosmorfometricos\\_ENANPEGE2019\(1\)\(1\).pdf](https://www.enanpege2019.anpege.ggf.br/resources/anais/8/1562640763_ARQUIVO_1.Analiseatributosmorfometricos_ENANPEGE2019(1)(1).pdf)

MENDONÇA, F. (org). *Riscos climáticos: Vulnerabilidades e resiliência associados*.

Jundiaí, **Paco Editorial**: 2014. 388p.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. SANTOS, H. G. Mapeamento digital de classes e atributos de solos: métodos, paradigmas e novas técnicas. Rio de Janeiro : **Embrapa Solos**,2003.<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/338308/1/doc55mapeamntodigital.pdf>>

MEYERHOF, G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *J SoilsMechanics and Foundation Division ASCE*, 82(SM1).4.

MICHEL, G. P. KOBIYAMA, M. GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of soils and sediments*, 2014. **Springer Berlin Heidelberg** <<https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2015/05/Michel-et-al-2014-JSSS-Shalstab-and-Sinmap.pdf>>

MILLIGAN, G. ; LEE E. M.. FOOKES P. G. *Geomorphology for Engineer* (2005,CRC **Press, Whittles Pub**).Pdf

Minnesota Department of Transportation, **Pavement Design**, 2007 <http://www.dot.state.mn.us/materials/pvmtdesign/manual2007.html>.

MIKLOS, L., *et al.* 2019. *Landscape as a Geosystem*. 2019 **Springer Nature** Switzerland AG. Springer is part of Springer Nature 78-3-319-94024-3.

MONTEIRO, CARLOS. A. F. *Geossistemas – História de uma procura*. São Paulo: Editora **Contexto**, 2001. v. 01. 154 p.

MONTEIRO, C. A. F. *O clima e a organização do espaço no estado de São Paulo*. São Paulo: **USP/Igeog.**, 1976. (série Teses e Monografias, 28)

MONTGOMERY, D.R. *et al.* Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall. *AGU:Surface Water and Climate* Volume33, Issue1 January 1997 Pages 91-10<<https://doi.org/10.1029/96WR02985>>.

MONTGOMERY, D.R. *et al.* 1998. Regional test of a model for shallow landsliding. **Hydrological Processes**, 12: 943- 955.<[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199805\)12:6<943::AID-HYP664>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199805)12:6<943::AID-HYP664>3.0.CO;2-Z)>

MONTGOMERY , D. R. e DIETRICH, W.E. 1994, A physically based model for topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, vol.30, no.4, p.1153 -1171

MONTAVON, G., SAMEK, W., MULLER, K., Methods for interpreting and understanding deep neural networks, **Digital Signal Processing**, Volume 73, 2018, Pages 1-15, ISSN 1051-2004, <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.10.011>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200417302385>)

NETER, J., *et al* (1996) **Applied Linear Statistical Models**. 4th Edition, WCB McGraw-Hill, New York.

NICU, I. C. e ASANDULESEI, A. (2018). GIS-based evaluation of diagnostic areas in landslide susceptibility analysis of Bahluiet River Basin (Moldavian Plateau, NE Romania). Are Neolithic sites in danger?. **Geomorphology**. 314. 27-41. [10.1016/j.geomorph.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.04.010).

NUNES D. M. *et al*. 2016. Uso Integrado do Modelo Shalstab e Análise Multicritério para Mapeamento de Áreas Susceptíveis aos escorregamentos de Terra na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa - MG. **Revista Brasileira de Cartografia** (2016), No 68/9, Edição Especial Movimentos de Massa e Processos Erosivos: 1853-1868 ISSN: 1808-0936

OBRZUD, R. e TRUTY, A. **The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook Z Soil**. PC 100701 report, revised 31.01.2012.

O. CORAND, *et al*. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, **Geosci. Model Dev.**, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

O'LOUGHLIN, E. M. "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis". **Water Resources Research** , v. 22, n. 5, pp. 794-804, 1986.

OLIVEIRA, J.R., BRAGA, F. A., COSTA, M. R. Impacto do Eucalipto na fertilidade do solo. IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, ComGeA, 2018. <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2018/V-002.pdf>

PAULA, T. L. F. CAMPOS, J. E. G. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. **RBRH** vol. 21 no .1 Porto Alegre jan./mar. 2016 p. 11 - 24. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p11-24>.

PACK, R.T. Tarboton, D.G. and Goodwin, C.N. (1998) The SINMAP approach to terrain stability mapping. Proceedings of 8th **Congress of the International Association of Engineering Geology**, Vancouver, British Columbia, Canada, p.1157-1165.

PINTO, C.S. Curso Básico de Mecânica dos Solos (16 Aulas) 3o **Edição da Oficina de Texto**, 2006.

PECK, R. B., HANSON, W. E. e THORNBURN, T. H. (1974). **Foundation Engineering**, John Wiley & Sons, New York, 514 pp.

PERSICHILLO, M. P., *et al.* 2018. The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides, **CATENA**, Volume 160, Pages 261-274, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.025>.

REID, S.C. et. al. Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments? **Geomorphology** Volume 90, Issues 3–4, 15 October 2007, Pages 263-282

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. **Soil Science**, v.136, 1983. p.250–268.

REYNOLDS , W. D.; ELRICK, D. E. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, v.140, n° 4, 1985. p. 292–302.

REYNOLDS W.D. and ELRICK D.E. (2002) Hydraulic Conductivity of Saturated Soils, Constant Head Method. In: *Methods of Soil Analyses, Part 4, Physical Methods, Book Series 5*, Soil Science Society of America, Madison, WI, 694-700.

RICHARDS , B. G. Capillary conduction of liquids through porous medium. **Physics**, New York, 1, 1931. p. 318-333.

RUMELHART, D., HINTON, G. e WILLIAMS, R. Learning representations by back-propagating errors. **Nature** 323, 533–536 (1986). <https://doi.org/10.1038/323533a0>  
[https://www.iro.umontreal.ca/~vincentp/ift3395/lectures/backprop\\_old.pdf](https://www.iro.umontreal.ca/~vincentp/ift3395/lectures/backprop_old.pdf)

ROSSI, M. 2017. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: **Instituto Florestal**, 2017. V.1. 118p.

ROSSO, R., RULLI, M. C., e VANNUCCHI, G. (2006). A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. **AGU - Water Resources Research**. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005WR004369>.

SAATY, T.L. The Analytic Hierarchy Process. **McGraw-Hill**, New York, 1980.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO. Estações de Tratamento de Água. Sorocaba: **SAAE**,2020.Disponível em: <https://www.saaesorocaba.com.br/>. Acesso em: 5 jul. 2020.

SALES, V.C. Geografia, Sistemas e Análise ambiental: abordagem crítica, **GEOUSP Espaço e Tempo**, São Paulo, N°16 – pp 125-141,2004.

SBROGLIA, R. M.; REGINATTO, G. M. P.; HIGASHI, R. A. R.; GUIMARÃES, R. F. Mapping susceptible landslide areas using geotechnical homogeneous zones with different DEM resolutions in Ribeirão Baú basin, Ilhota/SC/Brazil. **Landslides**, v. 1, p. 1-14, 2018

SCCOTI, A.A.V.; ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R. Estudo do Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí com base em parâmetros morfométricos – oeste do rio Grande do Sul. **Geo UERJ**, 2016. E-ISSN 1981-9021, <doi:00010.12957/geouerg.2016.15110>

SEGA, K. R. Determinação do ângulo de atrito e adesão entre solo e materiais de construção. Painel apresentado no **XIX Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP**, 2011.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C.T. Classificação hierárquica automatizada de formas do relevo no estado do Paraná apoiada na modelagem digital do terreno **Revista Brasileira de Geografia Física** V. 08 N. 05(2015) 1509-1523.

SIRTOLI, A.E. *et al.* Atributos do Relevo Derivados de Modelo Digital de Elevação e suas Relações com Solos. **Scientia Agraria** v. 9, n. 3 (2008) DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v9i3.11517>

STABILE, R. A.; VIEIRA, B. C. Análise do papel exercido pela topografia na distribuição das feições erosivas da bacia hidrográfica Água da Faca, Piratininga (SP), a partir de um modelo digital de elevação. Anais... In: **12º Congresso de Geógrafos da América Latina - EGAL**. Montevideo, 2009.

STRAHLER, A. N. Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis; Part 1. **Am J Sci** October 1, 1950 248:673-696; doi:10.2475/ajs.248.10.673

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP, **Resource Instruction** 2800 - Santa Barbara, CA. 93130 U.S.A. 0898-2800K1 (Dec 2012.2) <[https://www.soilmoisture.com/pdfs/Resource\\_Instructions\\_0898-2800\\_2800K1%20Guelph%20Permeameter%20.pdf](https://www.soilmoisture.com/pdfs/Resource_Instructions_0898-2800_2800K1%20Guelph%20Permeameter%20.pdf)>

SORBINO, G. SICA, C. CASCINI, C. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models **Nat Hazards** (2010) 53:313–332 DOI 10.1007/s11069-009-9431-y

SOTCHAVA, V. B. Por uma teoria de classificação de geossistemas da vida terrestre. São Paulo: **Instituto de Geografia USP**, 1978.

SOTCHAVA, V. B. O estudo de geossistemas. São Paulo: **Instituto de Geografia USP**,1977.

SUERTEGARAY, D. M. A. Espaço geográfico uno múltiplo. In: SUERTERGARAY, D.M.A.; 2000

TEN CATEN A. *et al.* Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira Digital soil mapping: characteristics of the brazilian approach **Ciências do Solo; Cienc. Rural** 42 (11); Nov 2012; <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012001100013>

TERZAGHI, K. Bearing capacity of soil; a restatement of the basis for rules as to bearing capacity of cohesionless and cohesive materials.1928 **Engineering News - Record**,Vol.100, No. 16, pp. 629-630.

TERZAGHI, K. Mechanism of landslides. Geological Society of America. 1950 Engineering geology. **Berkley**. Vol., November, pp. 83 -123.

TERZAGHI, K. PECK, R.B. E MESRI, G. (1996) Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd Edition, **John Wiley and Sons**, Inc., New York.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1957. 311p.

TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.;AMARAL, R. 2009. Desastres Naturais: conhecer para prevenir. **Instituto Geológico**, São Paulo, 196 p

TROPPEMAIR, H. A Cobertura Vegetal Primitiva do Est. de São Paulo. **Biogeografia** n°2 São Paulo: IG, USP, 1969.

TRENTIN, R. ROBAINA, L. E. S. AUTOMATED CLASSIFICATION OF LANDFORMS WITH GIS SUPPORT. **Mercator**, Fortaleza, v.19, may 2020. ISSN 1984-2201. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/e19012>>. Date accessed: 09 july 2020. doi: <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19012>.

TRICART, J.J.L. Ecodinâmica. Rio de Janeiro: IBGE – **Supren**, 1977.

URQUHART C. The Application of a Physical Model for Slope Stability Changes Due to Wildfire: A Case Study of the Elephant Hill Fire in Central British Columbia. **TRAIL-SIX-JOURNAL**, Volume 12, 2018

VARNES, D. J. (1954) Landslide types and processes. In: Eckel EB (ed) Landslides and engineering practice, special report 28. Highway research board. **National Academy of Sciences**, Washington, DC, pp. 20

VARNES, D. J. 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board , **National Academy of Science**, Washington D. C., 11-33.

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

VARNES, D. J. Savage W (eds.) (1996) The Slumgullion earthflow: a large-scale natural laboratory. **U. S. Geological Survey Bulletin** 2130 24

VASCONCELOS, VIEIRA V. *et al.* Disaster risk management and hydrographic basin analysis: the geotechnical map of suitability for the urbanization of Itapevi – São Paulo, Brazil. **Cadernos Metr pole** [online]. 2018, v. 20, n. 42 [Accessed 14 June 2021] , pp. 371-398. Available from: <<https://doi.org/10.1590/2236-9996.2018-4204>>. ISSN 2236-9996. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2018-4204>.

VIEIRA, E. F. 2010. “DINÂMICA DOS AMBIENTES NATURAIS”, 7.ed

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Modelos em geografia física: conceitos e aplica es na previsão de escorregamentos. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 20, n. 1, p. 194- 206, m s. 2016. ISSN 2179-0892.

VIEIRA, B. C. RAMOS, H. Aplica o do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 29, p. 161-174. 2015.

BAYRAKTARLI, Y. Y. Application of Bayesian Probabilistic Nteworks for Liquefaction of Soil. 6th International PhD Symposium in Civil Engineering Zurich, August 23-26, 2006. Disponivel em: [http://www.merci.ethz.ch/Publications/247\\_Bayraktarli.pdf](http://www.merci.ethz.ch/Publications/247_Bayraktarli.pdf)

WILSON, C. J.; DIETRICH, W. E. The contribution of bedrock groundwater flow to storm runoff and high pore pressure development in hollows, **IAHS Publ.**, 165, 49-59, 1987

WANG, L. e LIU, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**. 20. 193-213. 10.1080/13658810500433453.

WANG, R. X. e YUAN, X. H., 2005. Accuracy and track velocity of coarse grating displacement measurement system. Bandaoti Guandongian/Semiconductor **Optoelectronics** [online]. 2005. Vol. 26, no. SUPPL., p. 152–155. Available from: [https://www.ieee.cz/knihovna/Zhang/Zhang100-ch03.pdf?fbclid=IwAR3-quybtazmyz5hnxqkV5j7FLX0XQjfiwcSi\\_k3AV2oQ2ETH5ccE6N7v5c](https://www.ieee.cz/knihovna/Zhang/Zhang100-ch03.pdf?fbclid=IwAR3-quybtazmyz5hnxqkV5j7FLX0XQjfiwcSi_k3AV2oQ2ETH5ccE6N7v5c)

WOLLSEIFEN, T. 2019. Using R to build artificial neural networks in medical data. **GmbH**

**Stefan-George-Ring.** München, Germany. Disponível em: [www.lexjansen.com/phuse/2019/ml/ML06.pdf](http://www.lexjansen.com/phuse/2019/ml/ML06.pdf)

WU, W e SIDLE, C. R. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins. **Water Resources Research**, Volume 31, August 1995. Pages 2097-2110.

YIN, F. *et al.* Experimental and Numerical Analysis of XCC Pile-Geogrid Foundation for Existing Expressway Under Traffic Load. *Int J Civ Eng* 16, 1371–1388 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0267-7>

ZAIDAN, R. T.; FERNANDES, N. F. Zoneamento de suscetibilidade a escorregamentos rasos em encostas aplicado à Bacia de Drenagem Urbana do córrego do Independência Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 10, n. 2, p. 57-76, 2009.

ZEVENBERGEN, L. W THORNE, C. R. Quantitative Analyses of Land Surface Topography. **Earth Surface and Landforms** - Volume 12, 47 - 56 (1987) <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>.

ZHANG, Z. (2016). Neural networks: further insights into error function, generalized weights and others. **Annals of translational medicine**, 4(16), 300. <https://doi.org/10.21037/atm.2016.05.37>

SILVA, G. R. *et al.* 2013. Sorption of fomesafen in Brazilian soils. **Planta Daninha**. 31. 971-977. 10.1590/S0100-83582013000400023.

JUNIOR, J. S. *et al.* 2020. Estimation of tropical soils' hydraulic properties with inverse method and tension infiltrometer field data. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 15. 1. 10.4136/ambi-agua.2503.

DIAS, H. *et al.* 2003. Caracterização de solos altimontanos em dois transectos no Parque Estadual do Ibitipoca (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 27. 469-481. 10.1590/S0100-06832003000300009.

YANG, W. *et al.* 2020. Using Principal Components Analysis and IDW Interpolation to Determine Spatial and Temporal Changes of Surface Water Quality of Xin'anjiang River in Huangshan, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 2020; 17(8):2942. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082942>.




**Locais cadastrados como Área de Risco de Deslizamento**

	<b>BAIRRO</b>	<b>LOCAL</b>	<b>RISCO</b>
1	Bairro dos Morros	Rua Padre Cícero	Deslizamento
2	Brigadeiro Tobias	Rua Alfredo Fernandes	Deslizamento
3	Brigadeiro Tobias	Rua Bernardino Camargo Reis	Deslizamento
4	Brigadeiro Tobias	Rua Manoel R. Peres	Deslizamento
5	Brigadeiro Tobias	Rua Vítor Gomes Correa	Deslizamento
6	Central Parque	Rua Érico Veríssimo	Deslizamento
7	Jd Abatiá	Rua Projetada E	Deslizamento
8	Jd Abatiá	Rua Projetada J	Deslizamento
9	Jd Aeroporto	Av. Adão Pereira de Camargo, 220	Deslizamento
10	Jd Europa	Av. Sorocaba / Alameda Itália	Deslizamento
11	Jd Europa	Rua Áustria	Deslizamento
12	Jd Europa	Rua Rússia	Deslizamento
13	Jd Ipiranga	Rua 10 – Viela 515	Deslizamento
14	Jd Ipiranga	Rua 10 – Viela 518	Deslizamento
15	Jd Ipiranga	Rua 10 – Viela s/nº	Deslizamento
16	Jd Marco Antonio	Rua José Lopes Soares, 89 e 96	Deslizamento
17	Jd Marco Antonio	Rua Tomaz Cortez, 245	Deslizamento
18	Jd Nova Esperança	Rua Amadeu Mozart (final da rua)	Deslizamento
19	Jd Nova Esperança	Rua Humberto Sampaio de Souza	Deslizamento
20	Jd Nova Esperança	Rua Mons. Benedito Mario Calazans	Deslizamento
21	Jd Refúgio	Rua Projetada II	Deslizamento
22	Jd Refúgio	Rua Romeu Micheletti	Deslizamento
23	Jd Simus	Alameda das Acácias	Deslizamento
24	Jd Simus	Alameda dos Antúrios (final da rua)	Deslizamento
25	Parque Esmeralda	Rua João Avelino José (antes e após o afluente do córrego)	Deslizamento
26	Trujilo	Rua Mary Dora Dariato Favoreto	Deslizamento
27	Vila Astúrias	Rua Antônio Fratti	Deslizamento
28	Vila Astúrias	Rua Joaquim Roque de Oliveira	Deslizamento
29	Vila Astúrias	Rua Santa Marina	Deslizamento
30	Vila Astúrias	Rua Santo Eduardo	Deslizamento
31	Vila Astúrias	Rua São João	Deslizamento
32	Vila Barão	Rua Fernão Dias Paes	Deslizamento
33	Vila Barcelona	Rua 47	Deslizamento
34	Vila Barcelona	Rua Venezuela	Deslizamento
35	Vila dos Dalmatas	Rua José Henrique da Costa	Deslizamento



**Locais cadastrados como Área de Risco de Deslizamento**

36	Vila dos Dalmatas	Rua Salvador de Lima	Deslizamento
37	Vila Haro	Rua Jorge Coubarssier	Deslizamento
38	Vila Haro	Rua Maria Aparecida Brunetti	Deslizamento
39	Vila Haro	Rua Santa Isabel	Deslizamento
40	Vila Hortência	Rua Profº Enéas Proença de Arruda	Deslizamento
41	Vila João Romão	Rua Adelino Scarpa	Deslizamento
42	Vila João Romão	Rua José Hipólito Godoy	Deslizamento
43	Vila João Romão	Rua José Rodrigues Del Pino	Deslizamento
44	Vila João Romão	Vila Francisco Ferreira dos Santos	Deslizamento
45	Vila Sabiá	Rua Dioniso Bueno Sampaio	Deslizamento
46	Vila Sabiá	Rua Frei João Evangelista Steiner / Rua Antonio Gazzola	Deslizamento
47	Vila São João	Rua Frederico Guilherme Grohman	Deslizamento
48	Vila São João	Rua Paulino Faria	Deslizamento
49	Vila Zacarias	Rua Paulo Alves de Souza	Deslizamento
50	Vila São João	Rua João Monteiro Vilcher	Deslizamento

Alexandre Rosa Lima  
Chefe de Seção da Defesa Civil

## ANEXO II

```
#Treinamento-----  
  
library(neuralnet)  
  
library(data.table)  
  
setwd("~/Área de Trabalho/R/research/atributos_solo/neural/nafis_2/")  
  
#Coesao -----  
  
dados <- read.table("dados_coesao.csv", sep = ",", dec = ".", header = T,  
stringsAsFactors = F)  
  
summarise(dados)  
  
# Treina a rede neural  
  
nn <- neuralnet(cohesion ~ compacted + saturated + gravel + sand + fines,  
dados,  
linear.output = T, hidden = c(10))  
  
plot(nn)  
  
# Calcula o erro percentual  
  
print(sum(abs(unlist(nn$net.result)-nn$response))/sum(abs(nn$response)))  
  
# Salva a rede  
  
# saveRDS(nn, "rede_neural_coesao.rds")  
  
# Configuracoes que deram certo e seus erros percentuais  
  
hidden = c(9) 16,6%  
  
hidden = c(10) 15%
```

```

hidden = c(10, 2) 10,7%

# Angulo de atrito-----

dados <- read.table("dados_angulo.csv", sep = ",", dec = ".", header = T,
stringsAsFactors = F)

# Treina a rede neural

nn <- neuralnet(angle ~ compacted + gravel + sand + fines,
dados,
linear.output = T, hidden = c(5))

plot()

# Calcula o erro percentual

print(sum(abs(unlist(nn$net.result)-nn$response))/sum(abs(nn$response)))

# Salva a rede

# saveRDS(nn, "rede_neural_angulo.rds")

#Criando a rede neural artificial-----

library(neuralnet)

library(data.table)

library(dplyr)

setwd("~/Área de Trabalho/R/research/atributos_solo/neural/nafis_2/")

# Novos dados

novos_dados <- read.table("novos_dados.csv", sep = ",", dec = ".", header = T)

# Redes neurais

```

```

rede_neural_coesao <- readRDS("rede_neural_coesao.rds")

rede_neural_angulo <- readRDS("rede_neural_angulo.rds")

# Calcula os erros percentuais

print(sum(abs(unlist(rede_neural_coesao$net.result)-
rede_neural_coesao$response))
/sum(abs(rede_neural_coesao$response)))

print(sum(abs(unlist(rede_neural_angulo$net.result)-
rede_neural_angulo$response))
/sum(abs(rede_neural_angulo$response)))

# Prediz novos resultados, assume que o solo nao e compactado

novos_dados$coesao <- predict(rede_neural_coesao, novos_dados[,3:6] %>%
mutate(., compacted = 0))

novos_dados$angulo <- predict(rede_neural_angulo, novos_dados[,4:6] %>%
mutate(., compacted = 0))

# Salva os dados finais -----

write.table(novos_dados[, c(1:2, 7:8)],
"dados_finais")

```