



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E
GESTÃO TERRITORIAL

Gabriel Guerra Guaragna

**MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS
DE MASSA: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA SUPORTE À TOMADA
DE DECISÃO EM PLANEJAMENTO TERRITORIAL.**

Florianópolis
2024

Gabriel Guerra Guaragna

**MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS
DE MASSA: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA SUPORTE À TOMADA
DE DECISÃO EM PLANEJAMENTO TERRITORIAL.**

Dissertação submetida ao Programa de pós-graduação em Engenharia de transportes e gestão territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia de transportes e Gestão Territorial.

Orientador: Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra

Guerra Guaragna, Gabriel
MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS
GRAVITACIONAIS DE MASSA: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA
SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO EM PLANEJAMENTO TERRITORIAL. /
Gabriel Guerra Guaragna ; orientador, Rafael Augusto dos
Reis Higashi, 2024.
177 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial,
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2.
Probabilidade. 3. SHALSTAB. 4. Incerteza. 5. Estabilidade
de Taludes. I. Augusto dos Reis Higashi, Rafael. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão
Territorial. III. Título.

Gabriel Guerra Guaragna

**MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS
GRAVITACIONAIS DE MASSA: UMA ABORDAGEM PROBABILÍSTICA PARA
SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO EM PLANEJAMENTO TERRITORIAL.**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Everton da Silva, Dr.

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Orlando M. de Oliveira, Dr.

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Lia Caetano Bastos, Dr(a).

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes e Gestão
Territorial.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi Dr.
Orientador(a)

Florianópolis, 2024.

Este trabalho é dedicado a todos que de alguma forma contribuíram com meu crescimento e conhecimento, especialmente, meus pais.

AGRADECIMENTOS

Nos anos que se passaram para que esta dissertação pudesse ser concluída tive o apoio e auxílio de pessoas incríveis. Expresso aqui meus sinceros sentimentos a todos que de alguma forma estiveram presentes neste período, e todos que ajudaram a me moldar até o presente momento. Dedico um agradecimento especial ao meu amigo de infância Thiago Deeke Viek, que me introduziu e ensinou muito em relação à programação, além de auxiliar exaustivamente no desenvolvimento do código desta dissertação. Ao Thiago, que esteve presente em todo o período de desenvolvimento e ouviu todas as minhas teorias e abstrações, muito obrigado. Certamente sem as considerações, experiência e conhecimento do meu amigo e orientador Rafael Augusto dos Reis Higashi, esta dissertação não teria sido concluída. Agradeço imensamente todo o apoio e oportunidades fornecidos. Em primeiro lugar, não posso expressar em palavras a gratidão pelo apoio incondicional da minha família. Sempre estiveram presentes e sempre fizeram tudo o que podiam para que esse período de mestrado passasse da melhor forma possível. Faço também menção aos meus amigos Victor Campanelli e Ricardo Tridapalli, não por auxiliar no desenvolvimento da dissertação ou contribuir com conhecimentos específicos, mas sim pelo apoio incondicional no decorrer dos mais de 10 anos de amizade. Obrigado pelos inúmeros churrascos, risadas e por me fazer espairar dos problemas. Gostaria de deixar meus agradecimentos ao Otto Tomaszewski por todo o auxílio e disponibilidade no laboratório de solos da UFSC e à Teste Solo por permitir que eu utilizasse o seu laboratório.

"Science is a cooperative enterprise, spanning the generations. It's the passing of a torch from teacher, to student, to teacher. A community of minds reaching back to antiquity and forward to the stars." (DEGRASSE TYSON, 2014)

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia probabilística para a avaliação da estabilidade de encostas em um âmbito regional. A metodologia, denominada SHALSPROB, utiliza conceitos probabilísticos para transformar as informações determinísticas e incertas relacionadas ao cálculo do SHALSTAB em probabilidades. O modelo faz uso de funções densidade de probabilidade para variar, dentro do espaço amostral, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e condutividade hidráulica saturada das unidades geotécnicas da área de estudo. Para levar em consideração a não linearidade envolvida no processo, foram implementadas duas funções de ativação às saídas do modelo SHALSTAB, de duas formas distintas. As unidades geotécnicas foram em um primeiro momento definidas através de sensoriamento remoto e posteriormente confirmadas em campo, isto se deu, pois, o modelo foi testado para duas situações distintas, o caso bancos de dados genéricos (BD) e dados de campo locais (BST). Como resultados, foram gerados dois mapas determinísticos estáticos SHALSTAB, utilizando os valores médios dos dados; seis mapas estatísticos determinísticos SHALSTAB; dois mapas probabilísticos e um mapa de precipitações críticas. O último foi gerado através de uma relação entre as probabilidades SHALSTAB e uma distribuição cumulativa de probabilidades da precipitação local. Para a validação dos resultados, aplicaram-se 3 métodos o *Receiver Operating Characteristic* (ROC) e *Area Under the ROC Curve* (AUC); os índices de acerto (*IA*) e erro (*IE*) e a entropia cruzada, a última mede a distância da probabilidade efetiva real em relação a predição. Para o modelo banco de dados, o mapeamento probabilístico a razão *IA/IE* resultou em 2,87, o AUC foi de 0,887 e através da entropia cruzada, constatou-se subestimação do modelo. Já o modelo apoiado em dados de campo obteve uma razão *IA/IE* de 2,73 e um AUC de 0,896. O principal diferencial entre a utilização de dados de campo em vez de um banco de dados genéricos foi a possibilidade de elevação do limiar de instabilidade de 60% para 80%, foi possível verificar que o modelo com limiar em 60% mapeia apenas 9,6% a mais as cicatrizes do que o modelo BST com o limiar em 80%, demonstrando uma superioridade do segundo em relação ao primeiro. Ainda assim, ambos os modelos foram capazes de superar incertezas e trazer bons resultados.

Palavras-chave: Probabilidade. SHALSTAB. Incerteza, Estabilidade de Taludes.

ABSTRACT

This dissertation aims at developing a probabilistic methodology for the assessment of slope stability at a regional level. The methodology, called SHALSPROB, uses probabilistic concepts to transform the deterministic and uncertain information related to the SHALSTAB calculation into probabilities. The model makes use of probability density functions to vary, within the sample space, the shear strength and saturated hydraulic conductivity parameters of the geotechnical units of the study area. To take into account the non-linearity involved in the process, two activation functions were implemented to the outputs of the SHALSTAB models. The geotechnical units were first defined through remote sensing and later confirmed in the field, this was because the model was tested for two different situations, the case of generic databases (DB) and local field data (BST). As results, two static deterministic SHALSTAB maps were generated using the mean values of the data; six statistical deterministic SHALSTAB maps; two probabilistic maps and one critical rainfall map. The latter was generated by relating the SHALSTAB probabilities to a cumulative probability distribution of local rainfall. For the validation of the results, three methods were applied: the Receiver Operating Characteristic (ROC) and Area Under the ROC Curve (AUC); the hit (AI) and error (IE) indices and the cross entropy, the latter measuring the distance of the actual effective probability from the prediction. For the database model, the probabilistic mapping the AI/IE ratio resulted in 2.87, the AUC was 0.887 and through the cross entropy, it was found underestimation of the model. On the other hand, the model based on field data obtained an AI/IE ratio of 2.73 and an AUC of 0.896. The main difference between the use of field data instead of a generic database was the possibility of raising the instability threshold from 60% to 80%, it was possible to verify that the model with a threshold of 60% maps only 9,6% more scars than the BST model with a threshold of 80%, demonstrating a superiority of the second in relation to the first. Even so, both models were able to overcome uncertainties and provide good results.

Keywords: Probability. SHALSTAB. Uncertainty, Slope Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Grau de detalhe para cartas de risco	26
Figura 2: Definição das unidades geotécnicas.	28
Figura 3: Componentes que governam a resistência ao cisalhamento.	37
Figura 4: Critério de ruptura de Möhr-Coulomb.....	38
Figura 5: Equipamento <i>Borehole Shear Test</i>	43
Figura 6: Sonda BST posicionada em um furo de sondagem.	44
Figura 7: Envoltória de cisalhamento BST.	44
Figura 8: Incertezas associadas a geotecnia.	46
Figura 9: Ilustração de uma Queda.....	49
Figura 10: Ilustração de um Tombamento	50
Figura 11: Ilustração de Escorregamentos	51
Figura 12: Ilustração de uma Corrida.....	51
Figura 13: Ilustração de um Rastejo.....	52
Figura 14: Modelo de encostas infinita.	54
Figura 15: O modelo de estado uniforme TOPOG.....	57
Figura 16: Conceito de uma análise probabilística. PDF é o modelo de distribuição aleatório dos dados de entrada; P_f é a probabilidade de falha.	63
Figura 17: Distribuição densidade de probabilidade para um conjunto hipotético de dados de condutividade hidráulica saturada.	67
Figura 18: Ilustração conceitual do método Monte Carlo.....	69
Figura 19: Exemplo de separação das cicatrizes em zonas de ruptura (hachurado em preto) e acumulação.....	71
Figura 20: Gráfico ROC hipotético com pontos discretos.	72
Figura 21: Esquema para construção dos índices de acerto e erro	75
Figura 22: Sub-bacia do Ribeirão Araranguá – Blumenau, Santa Catarina.....	79
Figura 23: Imagem aérea da área de estudo	80
Figura 24: Série histórica de precipitações na estação meteorológica do bairro Garcia – Blumenau.....	82
Figura 25: Cicatrizes de MGM's na área da Sub-bacia.....	84
Figura 26: Planos de fratura em afloramento da Formação Gaspar.....	85
Figura 27: Mapa geológico da sub-bacia.	86

Figura 28: Declividade da sub-bacia do Ribeirão Araranguá	89
Figura 29: Área de contribuição da sub-bacia.....	90
Figura 30: Índice topográfico de umidade – TWI.....	91
Figura 31: Fluxograma de trabalho: etapa 1 – Criação das variáveis e confecção de banco de dados geotécnicos.....	93
Figura 32: Fluxograma de trabalho: etapa 2 – Simulação probabilística baseada no SHALSTAB	99
Figura 33: Rotina do método SHALSPROB.....	101
Figura 34: Profundidade do solo na sub-bacia.....	105
Figura 35: Profundidade do solo no entorno das cicatrizes.....	106
Figura 36: Distribuição densidade de probabilidade de z	107
Figura 37: Mapa pedológico da sub-bacia.....	108
Figura 38: Mapa geotécnico da Sub-bacia	110
Figura 39: PDF's BD. A) log-normal da coesão, B) log-normal do ângulo de atrito interno, C) gaussiana do peso específico, D) log-normal da condutividade hidráulica saturada.....	112
Figura 40: Mapeamento geotécnico final e pontos de ensaio.....	114
Figura 41: Envoltória de ruptura dos solos ensaiados.....	115
Figura 42: PDF's BST. A) log-normal da coesão, B) log-normal do ângulo de atrito interno, C) gaussiana do peso específico, D) log-normal da condutividade hidráulica saturada.....	116
Figura 43: Gráfico de plasticidade.....	117
Figura 44: Curvas granulométricas dos solos estudados.....	118
Figura 45: Divisão das cicatrizes e representação das zonas de ruptura.....	120
Figura 46: Histograma e densidade de algumas variáveis possivelmente condicionantes	121
Figura 47: Relação volume x distância percorrida (em metros).....	123
Figura 48: Mapas determinístico e estatísticos SHALSTAB - BD.....	124
Figura 49: Relação entre limiares de instabilidade e estabilidade.....	125
Figura 50: Função de Boltzmann das classes SHALSTAB	127
Figura 51: Mapa probabilístico SHALSTAB (BD)	128
Figura 52: Relações entre variáveis preditoras e probabilidades.....	129
Figura 53: Índices de acerto e erro dos mapas BD.....	131
Figura 54: Definição do limiar de instabilidade.....	132

Figura 55: Taxa de FP e VP em relação aos diferentes limiares.....	133
Figura 56: Curva ROC e função de custo associada	134
Figura 57: Análise ROC/AUC para os mapas BD	135
Figura 58: Entropia Cruzada – SHALSTAB probabilístico (BD)	136
Figura 59: Relação Entropia Cruzada e Probabilidades (BD).....	137
Figura 60: Mapas determinístico e estatísticos SHALSTAB - BST.	138
Figura 61: Função de ativação para as classes SHALSTAB.....	140
Figura 62: Mapa probabilístico SHALSTAB BST	142
Figura 63: Relações entre variáveis predictoras e probabilidades – BST.....	143
Figura 64: Índices de acerto e erro dos mapas BST	144
Figura 65: Definição do limiar de instabilidade BST.....	145
Figura 66: Taxa de FP e VP em relação aos diferentes limiares BST.....	146
Figura 67: Curva ROC e função de custo associada BST	146
Figura 68: Entropia Cruzada – SHALSTAB probabilístico (BST).....	147
Figura 69: Relação Entropia Cruzada e Probabilidades (BST).....	148
Figura 70: Relação entre os mapeamentos probabilísticos BD e BST.....	148
Figura 71: Comparação entre os modelos probabilísticos.....	150
Figura 72: Precipitação Crítica.....	151

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Destaque de trabalhos com contexto aproximado a esta dissertação.	18
Quadro 2: Classificações de desastres	23
Quadro 3: O essencial de uma Política de Gestão de Riscos	24
Quadro 4: Tipos de cartas geotécnicas	26
Quadro 5: Compilado de metodologias para o mapeamento geotécnico	27
Quadro 6: Siglas e classificações referentes às unidades geológicas.	29
Quadro 7: Siglas e classificações referentes às unidades pedológicas.	29
Quadro 8: Referências de estudos utilizando o BST.	45
Quadro 9: Tipos de movimentos gravitacionais de massa segundo Varnes (1978) ...	48
Quadro 10: Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade).....	48
Quadro 11: Matriz de confusão para avaliação de modelos.....	70
Quadro 12: Fatores importantes nas deflagrações dos MGM da sub-bacia.	80
Quadro 13: PDF's aplicadas à cada variável.....	99
Quadro 14: Coordenadas dos pontos ensaiados.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Frações granulométricas dos solos estudados neste trabalho retirados da literatura.....	36
Tabela 2: Valores de resistência ao cisalhamento dos solos estudados neste trabalho, retirados da literatura.	39
Tabela 3: Valores de condutividade hidráulica saturada referenciais. d é o diâmetro das partículas e hc é a altura do aumento de capilaridade.....	40
Tabela 4: Valores de condutividade hidráulica saturada para as unidades geotécnicas deste trabalho.	42
Tabela 5: Classificação do modelo SHALSTAB	60
Tabela 6: Funções probabilidade de densidade comumente utilizadas.	66
Tabela 7: Classificação dos valores AUC.	72
Tabela 8: Resultados AUC em modelos determinísticos - Zizioli (2013).	73
Tabela 9: Resultados AUC em modelos determinísticos – Cabral <i>et al.</i> (2022).....	73
Tabela 10: Índices de acerto e erro na literatura	76
Tabela 11: Estatísticas do modelo Monte Carlo SHALSTAB.....	102
Tabela 12: Declividade, altitude e área das classes de solo na sub-bacia	109
Tabela 13: Banco de dados geotécnico e sua estatística descritiva.....	111
Tabela 14: Dados BST, peso específico e estimativa de k_s	115
Tabela 15: Índices físicos dos solos estudados.	117
Tabela 16: Distribuição granulométrica em porcentagens.	119
Tabela 17: Possíveis limiares de instabilidade e estabilidade.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
MGM - Movimento gravitacional de massa
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDT - Modelo Digital de Terreno
TIN – Rede triangular irregular
SDS - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável
MDS - Mapeamento Digital do Solo
BST – *Borehole Shear Test*
FS – Fator de Segurança
PDF – Função densidade de probabilidade
GERCO - Projeto Gerenciamento Costeiro
SIG – Sistema de informações geográficas
PIB – Produto interno bruto
ECP – Estado de calamidade pública
SE – Situação de emergência
UG – Unidade geotécnica
TWI - Índice topográfico de umidade
SPI - Índice de potência de fluxo
FOSM - Segundo Momento de Primeira Ordem
CDF – Função cumulativa de densidade
ROC - *Receiver Operating Characteristic*
AUC - *Area Under the Curve*
CE – Entropia Cruzada
IA – Índice de acerto
IE – Índice de Erro
LL – Limite de liquidez
LP – Limite de plasticidade
IP – Índice de plasticidade
VP - Verdadeiro positivo
FP - Falso positivo
FN - Falso negativo
VN - Verdadeiro negativo

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo de atrito interno	$^{\circ}$
c	Coesão	kN/m^2
T	Força cisalhante	kN
θ	Declividade	$^{\circ}$
q	Taxa de recarga	m/d
b	Comprimento de contorno	m
a	Área de contribuição a montante	m^2
h	Altura da coluna d'água	m
ρ_a	Densidade da Água	kg/m^3
u	Poropressão	kN/m^3
z	Profundidade do solo	m
g	Aceleração da Gravidade	m/s^2
L	Comprimento	m
P	Peso da camada de solo	N
Q_s	Escoamento superficial	m^3/d
i	Gradiente hidráulico	m/m
γ_{nat}	Peso específico natural	kN/m^3
W	Peso total	kN
ρ_s	Densidade do solo	kg/m^3
τ	Resistência ao cisalhamento	kN/m^2
σ	tensão normal	kPa
w	Umidade	$\%$
T	Transmissividade	m^2/d
p_f	Probabilidade efetiva	$\%$
d	diâmetro das partículas	mm
h_c	altura do aumento de capilaridade	m
k_s	Condutividade hidráulica saturada	varia
$P_{(st)}$	Padronização SHALSTAB	-
\bar{x}	Média	-
σ	Desvio padrão	-
σ^2	Variância	-
Cov	Coefficiente de variação	$\%$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	ADERÊNCIA AO PPGTG	18
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	O USO E A OCUPAÇÃO DOS SOLOS	22
2.2	CONCEITOS LIGADOS À GESTÃO DE DESASTRES.....	23
2.3	A GESTÃO DE ÁREAS DE RISCO	24
2.4	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO.....	25
2.4.1	Metodologias para o mapeamento geotécnico.....	27
2.4.1.1	<i>Mapeamento geotécnico de grandes áreas - Davison Dias (1995).....</i>	<i>28</i>
2.5	ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS.....	30
2.5.1	A morfometria como indicativo no mapeamento pedológico	30
2.6	PROFUNDIDADE DO SOLO	32
2.7	ENSAIOS GEOTÉCNICOS.....	35
2.7.1	Caracterização física dos solos	35
2.7.1	Resistência ao Cisalhamento.....	37
2.7.1.1	<i>Critério de Ruptura de Mohr Coulomb</i>	<i>37</i>
2.7.1.2	<i>Parâmetros de Resistência</i>	<i>38</i>
2.7.1	Condutividade hidráulica	40
2.7.1	Ensaio Borehole Shear Test (BST).....	42
2.7.1	Incerteza na geotecnia	45
2.8	MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA (MGM).....	47
2.8.1	Incerteza na avaliação dos movimentos gravitacionais de massa	52
2.9	INTRODUÇÃO SHALSTAB	53

2.9.1	Modelo de Estabilidade de Encosta Infinita.....	54
2.9.2	Modelo Hidrológico de Estado Uniforme	56
2.9.1	Integração dos Modelos Hidrológico e Encosta Infinita: SHALSTAB	59
2.10	SHALSTAB E A RELAÇÃO COM A INCERTEZA	60
2.11	MÉTODOS PROBABILÍSTICOS	62
2.11.1	Variáveis Aleatórias.....	65
2.11.2	Método Monte Carlo	68
2.12	VALIDAÇÃO.....	70
2.12.1	Receiver Operating Characteristic e Area Under the Curve (ROC/AUC)	71
2.12.2	Cross-Entropy	73
2.12.3	Índice de Acerto e Erro	75
3	MATERIAIS	77
4	ÁREA DE ESTUDO	79
4.1	PRECIPITAÇÃO.....	81
4.2	MOVIMENTOS PRETÉRITOS (CICATRIZES).....	82
4.3	GEOLOGIA.....	84
4.4	PEDOLOGIA	86
4.5	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E PONTOS AMOSTRAIS	87
4.6	VARIÁVEIS TOPOGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS	88
5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	92
5.1	ETAPA 1: CRIAÇÃO DAS VARIÁVEIS E BANCO DE DADOS GEOTÉCNICOS	93
5.1.1	Geração do Mapa Profundidade do solo	94
5.1.2	Geração do Mapa Pedológico	95
5.1.3	Geração do Mapa Geotécnico.....	96
<i>5.1.3.1</i>	<i>Locais de investigação.....</i>	<i>96</i>

5.1.3.2	<i>Determinação dos parâmetros de resistência, peso específico e Condutividade Hidráulica</i>	97
5.2	ETAPA 2: SIMULAÇÃO, GERAÇÃO DAS PDF E VALIDAÇÕES	97
5.2.1	Simulação Monte Carlo	99
5.2.1.1	<i>Pós processamento da simulação</i>	101
5.2.2	Geração dos mapas e validação	102
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
6.1	PROFUNDIDADE DO SOLO	105
6.2	MAPA PEDOLÓGICO	107
6.3	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR	109
6.3.1	Distribuições PDF do banco de dados (BD)	110
6.4	RESULTADOS DE CAMPO: MAPA GEOTÉCNICO E DADOS GEOMECÂNICOS	112
6.4.1	Granulometria e Índices físicos	116
6.5	POTENCIAIS CONDICIONANTES E SUAS RELAÇÕES COM MGM'S	119
6.6	MAPAS - BANCO DE DADOS	123
6.6.1	Mapas Determinístico e Estatísticos (BD)	123
6.6.2	Mapa Probabilístico (BD)	126
6.6.3	Validação dos mapas: Banco de dados	130
6.7	MAPAS – BST	137
6.7.1	Determinístico e Estatísticos (BST)	138
6.7.2	Probabilístico (BST)	139
6.7.3	Validação dos mapas: BST	144
6.8	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PROBABILÍSTICOS	148
6.9	PRECIPITAÇÃO CRÍTICA	150
7	CONCLUSÕES	153
8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
9	REFERÊNCIAS	156

1 INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras estão passando por um processo intenso de urbanização, apresentando uma taxa de 81,2% no ano 2000 (BRITO *et al.* 2001). Este processo intenso deve ser subsidiado por um planejamento meticoloso das áreas que podem ser habitáveis sem a potencialidade de haver riscos futuros. Neste sentido, há no Brasil falta desses cuidados, fazendo com que várias populações mais vulneráveis se coloquem em situações potencialmente perigosas. Higashi (2006) cita que a expansão dos centros urbanos se inicia geralmente com a ocupação desordenada do solo pela população de baixa renda, onde as estruturas são construídas sem conhecimento geotécnico algum. O autor ainda afirma que para o correto direcionamento da mancha urbana, considera-se inicialmente alguns conhecimentos básicos como a resistência dos solos, o comportamento dos solos, a estabilidade dos taludes e a suscetibilidade dos solos à erosão.

Os limites impostos pelos solos são uma combinação de fatores, os quais indicam potencialidades na fragilidade do terreno. Estes fatores são geológicos, pedológicos, hidrológicos, topográficos e climáticos. A geologia combinada como a pedologia e topografia infere sobre os horizontes geotécnicos, os quais sumarizam os comportamentos geomecânicos ali contidos. São esses comportamentos que irão expressar a resistência ao cisalhamento a qual àquela unidade geotécnica irá suportar sem que rompa. Em contrapartida os fatores hidrológicos, climáticos e topográficos agem como desestabilizadores, por vezes fazendo o solo romper por saturação devido a uma chuva intensa, por estar situado em uma declividade demasiadamente elevada para àquela material ou por estar demasiadamente próximo de uma rede de drenagem.

Esta dinâmica pode ser prevista com o auxílio de métodos de mapeamento que irão tentar explicar a suscetibilidade, a probabilidade ou o risco em que as encostas estão frente a possibilidade de romper. Será a partir destas previsões que os tomadores de decisão poderão planejar da melhor forma para onde expandir o território, onde alocar uma população de baixa renda ou intervir para a estabilização de uma encosta pronta para desabar. Dessa forma fica evidente a importância do mapeamento para o planejamento e prevenção de riscos futuros, sendo essencial abordar a temática da forma mais precisa possível.

Portanto, este trabalho aplica duas metodologias, a abordagem SHALSTAB tradicional, com fim comparativo e o desenvolvimento de uma nova metodologia, baseada no modelo SHALSTAB, mas com o fim de acessar a probabilidade de rompimento das encostas.

Esta nova metodologia, denominada SHALSPROB, aplica o método de Monte Carlo para variar aleatoriamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento, profundidade do solo e a condutividade hidráulica a partir de distribuições densidade de probabilidade (PDF), criadas a partir do desvio padrão e médias das amostras testadas. Cada iteração no processo de cálculo do modelo SHALSTAB seleciona um valor aleatório das distribuições para popular as equações. Ao fim de n iterações cada elemento da matriz que compõe a área de estudo terá uma distribuição, da qual é possível calcular a probabilidade, o valor médio (susceptibilidade provável), a estatística moda para as susceptibilidades e mediana.

A importância do modelo proposto se deve principalmente pela consideração de que a incerteza é parte inerente do processo envolvendo deslizamentos. Além, métodos determinísticos, como é o caso do SHALSTAB, são também incertos pois expressam índices adimensionais que correspondem a um potencial risco. Estes índices são calculados a partir de parâmetros estáticos que não representam o verdadeiro comportamento dos solos, portanto, o índice resultado deve também ser incerto. A transformação para probabilidades, portanto, facilita a interpretação de quem venha a fazer uso dos mapeamentos e contorna a incerteza inerente do método determinístico ao valer-se de n cálculos para encontrar a espectância do modelo.

A técnica permitirá averiguar a susceptibilidade e a probabilidade de rompimento das encostas da sub-bacia do Ribeirão Araranguá, situada no município de Blumenau. Sub bacia esta que está inserida em um contexto social de exclusão, ou, de pessoas de baixa renda que tiveram que se deslocar para a localidade por falta de política urbana e entendimento da dinâmica geológica/geotécnica existente no local. Tal falta de política urbana, no contexto aqui discutido, tem fundamentação na especulação e no mercado imobiliário. A especulação imobiliária pode exacerbar a segregação socioespacial, empurrando populações de baixa renda para áreas periféricas sem infraestrutura básica devido ao aumento dos preços dos imóveis nas regiões centrais.

Trata-se de uma área altamente favorável aos movimentos gravitacionais de massa (MGM), com uma geologia propícia, uma topografia e climatologia altamente indutoras aos processos de MGM, além de profundidades de solo que propiciam MGM's rasos, o que justifica a utilização do modelo SHALSTAB.

Com o fim de aplicar as metodologias será utilizado o mapa geológico em escala 1:100.000 do Projeto Gerenciamento Costeiro - GERCO (3º fase), onde podem ser observadas litologias sedimentares, predominantemente arenitos. Já o mapa pedológico será

confeccionado a partir da interação de variáveis morfométricas e técnicas de sensoriamento remoto em resolução espacial de 1m, utilizando o modelo digital de terreno (MDT) da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SDS, 2010). A geração do mapa geotécnico seguirá as orientações da metodologia de Davison Dias (1995) e permitirá a amostragem dos horizontes geotécnicos para análise laboratorial, de campo e confecção dos modelos de suscetibilidade e probabilidade. Por fim, com o intuito de comparar os modelos serão aplicados métodos de validação em conjunto com um inventário de cicatrizes de MGM para determinar a precisão alcançada pelos modelos.

1.1 ADERÊNCIA AO PPGTG

Esta dissertação trata do mapeamento e previsão da estabilidade de encostas de forma espacial. Como tal, está inserida na área de concentração gestão territorial e na linha de pesquisa de planejamento territorial. Neste trabalho, realizado no âmbito do Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO), focou-se no detalhamento das análises de suscetibilidade e probabilidade à movimentos gravitacionais de massa, utilizando métodos estocásticos para ultrapassar incertezas relacionadas com o modelo determinístico base utilizado e, também, dos parâmetros geotécnicos.

A aderência do trabalho está associada à gestão do território, a qual nesta dissertação, é alcançada com a indicação de áreas suscetíveis à movimentos de massa. As áreas indicadas com alta probabilidade são perigosas e apresentam um risco associado à sua ocupação, portanto, não devem ser ocupadas. Os resultados alcançados pelo modelo definido para esta dissertação demonstram a probabilidade para a ocorrência de movimentos de massa em forma de mapas e gera como sub produto, mapas indicativos de quantidades de precipitação diárias necessárias para a instabilização das encostas. Os resultados podem ser utilizados para auxiliar no uso e ocupação do solo na sub bacia do Ribeirão Araranguá – Blumenau.

No histórico do PPGTG, foram encontradas oito dissertações que guardam afinidade com o tema deste trabalho. No Quadro 1, estão destacados os trabalhos considerados de contexto mais próximo ao desta dissertação.

Quadro 1: Destaque de trabalhos com contexto aproximado a esta dissertação.

Autor	Título	Conclusões
Zimmermann (2019)	Mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamento da bacia hidrográfica do rio Cachoeira e do rio da Prata – Joinville/SC	1) A metodologia apresentou bons resultados, espacialmente em áreas de relevo natural e pouca influência antrópica. 2) O método <i>Borehole Shear Test</i> para aquisição de dados de resistência ao cisalhamento apresentou alta correlação entre os pontos de diferentes tensões confinantes. 3) O SHALSTAB não é indicado para ser executado em áreas com elevado índice de urbanização.
Flach (2020)	Comparação entre os dados obtidos pelo <i>borehole shear test</i> e ensaio de cisalhamento direto no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC	1) A diferença na coesão entre o <i>Borehole Shear Test</i> e cisalhamento direto não se mostra preocupante na análise. 2) Os modelos <i>Borehole Shear Test</i> geraram mais áreas instáveis e menor correlação com as cicatrizes do que os advindos do cisalhamento direto. 3) Pelo <i>Borehole Shear Test</i> ser um ensaio de campo, possibilita-se mapear uma área muito maior, no mesmo tempo, do que utilizando o cisalhamento direto. 4) O <i>Borehole Shear Test</i> apresentou altas correlação entre os pontos de diferentes tensões confinantes.

Pode-se perceber que há trabalhos que têm contexto de aplicação no mesmo setor da presente dissertação. Destacam-se os trabalhos de Zimmermann (2019) e Flach (2020). Ambos os autores utilizaram o *Borehole Shear Test* para aquisição de dados de resistência ao cisalhamento, demonstrando boas correlações. Ambos os autores também aplicaram o método SHALSTAB para delinear a estabilidade das áreas estudadas, conseguindo bons resultados. No âmbito da gestão do território, ambos os autores definiram mapas com o intuito de indicar áreas suscetíveis aos movimentos de massa, portanto também objetivam auxiliar o melhor manejo do uso e ocupação dos solos das respectivas bacias analisadas. Já os demais seis trabalhos possuem relação com esta dissertação no quesito de avaliar propriedades geomecânicas dos solos, gerar mapeamento Geoambiental e de vulnerabilidade.

Observando-se o histórico de trabalhos do PPGTG, nota-se que a presente dissertação traz como contribuição específica a discussão em torno da incerteza envolvida em todos os processos de avaliação e delimitação das áreas instáveis em determinada localidade, desde parâmetros dos solos até o próprio modelo determinístico a ser utilizado. Zimmermann (2019) conclui que o modelo SHALSTAB não gera bons resultados em áreas bastante urbanizadas, provavelmente por que há influência nos parâmetros geotécnicos a partir da ocupação. Ao considerar que os parâmetros são incertos e randômicos, até certo ponto, há a possibilidade de tornar o modelo utilizável neste tipo de cenário. Por outro lado, Flach (2020) ao comparar o modelo SHALSTAB aplicando-o a parâmetros adquiridos de diferentes tipos de ensaio, nomeadamente o cisalhamento direto e *borehole shear test*, indiretamente discutiu a existência de incerteza. Para um mesmo solo, a depender do método de aquisição dos parâmetros, os resultados apresentarão flutuação. Nesse sentido, esta dissertação pode vir a ser subsídio para novas pesquisas em mapeamentos estocásticos (probabilísticos) para avaliação da estabilidade de taludes, estudos quantitativos a respeito da variação dos parâmetros geotécnicos para uma mesma unidade geotécnica e tópicos relacionados à incerteza na geotecnia. Todos os temas citados objetivam diminuir a incerteza que envolve o sistema solo no quesito geomecânico, fazendo com que se possam tomar decisões com maior assertividade e certeza no uso e ocupação dos solos.

1.2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste projeto.

1.2.1 Objetivo Geral

Construir um modelo para análise da estabilidade de taludes com utilização de conceitos de incerteza e probabilidade utilizando técnicas em SIG e programação para subsidiar a tomada de decisão a respeito dos riscos associados à ocupação urbana em territórios de fragilidade geotécnica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Propor método probabilístico de avaliação aos movimentos gravitacionais de massa;
- b) Contribuir com a política de solo no sentido de mitigar risco para pessoas com dificuldade financeira;
- c) Construir um banco de dados geotécnico, realizar campanha de campo para aquisição de parâmetros e análises laboratoriais.
- d) Realizar comparações de resultados com dados retificados em campo e dados sem estes cuidados.
- e) Relacionar a precipitação ao modelo, afim de definir limiares críticos para desestabilizar os taludes.
- f) Validar o modelo proposto através de estudo de caso em sub-bacia no município de Blumenau.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão expostos tópicos relevantes e conhecimentos importantes para a gestão e entendimento dos movimentos gravitacionais de massa.

2.1 O USO E A OCUPAÇÃO DOS SOLOS

As cidades, no Brasil, passaram a ser centros de geração de riquezas a partir do século XX, o que acabava por gerar aglomerações populacionais, como descrito por (BRITO *et al.* 2001). O crescimento desenfreado gera como consequência graves impactos ambientais devido a errônea disposição de resíduos no meio ambiente, segundo Souza (2013), foi a partir daí que foram criadas leis e instrumentos que tem por objetivo minimizar os impactos e preservar o meio ambiente, além de auxiliar no processo decisório do poder público. O instrumento que lida diretamente com a problemática ambiental é o Zoneamento Ambiental, o qual é considerado uma ferramenta do Plano Diretor, que passou a ser obrigatório para cidades com mais de 20.000 habitantes. Entretanto, segundo Santos (2014), os Planos Diretores brasileiros isoladamente não têm expressado o necessário casamento entre a ocupação urbana e as características do meio físico onde se instala, constituindo-se quase sempre em peça omissa frente aos comuns e temerários desencontros entre formas de ocupação e características geológicas e geotécnicas dos terrenos, fonte certa de futuros desastres e tragédias.

Os solos estão sujeitos a processos naturais, são geossistemas com entradas, processos e saídas (GROTZINGER; JORDAN, 2013). É exatamente por existirem entradas e saídas no sistema solo que se faz possível prever com algum grau de certeza como, quando e onde um processo pode se desencadear. Para o correto manejo desses solos, há que se ter um planejamento adequado e cuidadoso para que se evitem problemas futuros.

A tendência inicial das cidades é urbanizar áreas de fácil acesso, planas e que não apresentem grandes riscos quanto aos MGM, entretanto, como discutido por Riffel (2017), o processo de urbanização no Brasil levou a população de baixa renda a ocupar áreas vazias desprezadas pelo mercado, áreas ambientalmente frágeis, como margens de rios e encostas íngremes, que foram e são ocupadas de forma precária. Esse processo demonstra a falta de planejamento, demandando hoje ações de mitigação muitas vezes mais custosas do que se houvesse um planejamento inicial completo. Mesmo com a instauração da obrigatoriedade do plano diretor e dos instrumentos nele previstos para auxílio dos tomadores de decisão, empiricamente pode-se observar que grande parte dos municípios brasileiros não tomam o devido cuidado com relação ao solo.

No município de Blumenau a história se repete, o objeto de estudo deste trabalho está situado em uma área de exclusão social onde o processo discutido por Riffel (2017) é claramente observado

2.2 CONCEITOS LIGADOS À GESTÃO DE DESASTRES

Os termos desastre, perigo, risco e vulnerabilidade são rotineiros ao se tratar da gestão de áreas de risco (2.3). Para Kobiyama *et al.* (2006) desastres naturais são fenômenos naturais severos, influenciados por características regionais como solo, geologia, vegetação, topografia e condições meteorológicas. Quando estes fenômenos ocorrem em locais habitados por seres humanos e resultam em danos materiais e humanos e prejuízos socioeconômicos são considerados desastres naturais. O Quadro 2 apresenta as possibilidades de classificação dos desastres em quatro categorias.

Quadro 2: Classificações de desastres

Nível	Intensidade	Situação
I	Desastre de pequeno porte, onde os impactos causados são pouco importantes e os prejuízos pouco vultosos. (Prejuízo \leq 5% PIB municipal)	Facilmente superável com os recursos do município.
II	De média intensidade, onde os impactos são de alguma importância e os prejuízos são significativos, embora não sejam vultosos. (5% < Prejuízo \leq 10% PIB)	Superável pelo município, desde que envolva uma mobilização e administração especial.
III	De grande intensidade, com danos importantes e prejuízos vultosos. (10 % < Prejuízo \leq 30% PIB)	A situação de normalidade pode ser restabelecida com recursos locais, desde que complementados com recursos estaduais e federais. (Situação de Emergência – SE)
IV	Com impactos muito significativos e prejuízos muito vultosos. (Prejuízo > 30% PIB)	Não é superável pelo município, sem que receba ajuda externa. Eventualmente necessita ajuda internacional (Estado de Calamidade Pública – ECP).

Fonte: Modificado de Kobiyama et al. (2006)

Segundo Bertone e Marinho (2013) o aumento na ocorrência de desastres associados aos MGM é, em sua maioria, derivado da ocupação inadequada de áreas de risco geológico potencial como em áreas íngremes por assentamentos precários, a execução de cortes e aterros instáveis, depósitos de lixo nas encostas e fragilidade das construções.

O conceito de perigo é associado à palavra “*Hazards*” a qual, segundo Leoni *et al.* (2011) se destina aos eventos naturais que podem ocorrer em um dado período de tempo. É um evento físico, um fenômeno ou uma atividade humana que pode causar perdas humanas, materiais, degradação econômica ou ambiental. É importante ressaltar que o evento é algo

natural, que ocorre na biosfera rotineiramente, mas, quando há atividade humana nas remediações, pode se constituir um perigo ou ameaça.

Desastres são a combinação de perigos, condições de vulnerabilidade e capacidade insuficiente de reduzir as consequências de um risco. Risco é a probabilidade de ocorrência de danos em função do perigo e da vulnerabilidade dos elementos em risco. Por fim, a vulnerabilidade é o grau de perda de um determinado elemento ou um conjunto de elementos em risco (TOMINAGA, 2007).

2.3 A GESTÃO DE ÁREAS DE RISCO

Cerri e Nogueira (2012) discutem a inclusão da gestão dos riscos ambientais na agenda dos gestores públicos onde cita-se a necessidade da superação da sazonalidade por parte dos mesmos. Para os autores a gestão de risco fica “esquecida” fora dos períodos chuvosos, além de haver uma confusão quanto aos conceitos discutidos por parte dos gestores públicos, da mídia e da própria população, gerando improdutividade na forma de lidar com cada uma das situações.

Santos (2014) reitera a importância de programas de gestão de riscos geológicos, geotécnicos e hidrológicos focando em ações preventivas de regulação técnica do uso do solo e de provimento de habitações dignas e seguras para a população de baixa renda. Para o autor, o Quadro 3 resume o essencial de uma política de gestão de riscos com foco no objetivo de eliminar riscos.

Quadro 3: O essencial de uma Política de Gestão de Riscos

Caráter	Ações	Instrumentos de Apoio
PREVENTIVO – Visa impedir que o problema se instale.	Regulação técnica da expansão urbana impedindo-se radicalmente a ocupação de alta e muito alta suscetibilidade natural a riscos.	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa de Geodiversidade - Mapa de Suscetibilidade - Carta geotécnica - Plano Diretor - Desenhos Urbanísticos - Lei de Zoneamento - Códigos de Obra.
	Regulação técnica da expansão urbana obrigando que áreas de baixa e média suscetibilidade natural a riscos somente possa ser ocupada com técnicas adequadas.	
CORRETIVO	Reassentamento de moradores de áreas de alto e muito alto risco geológico natural.	<ul style="list-style-type: none"> - Cartas de Riscos - Ações de reurbanização - Intervenções de consolidação geotécnica.
	Consolidação geotécnica de áreas de baixo e médio risco geológico natural e de áreas de risco induzido.	

Continuação: Quadro 3

EMERGENCIAL	Remoção imediata de moradores de áreas de alto e muito alto risco em situações críticas.	<ul style="list-style-type: none"> - Carta de Riscos - Ações de Defesa Civil - Sistemas de Alerta.
	Concepção e implementação de Planos Contingenciais de Defesa Civil com participação ativa da população.	

Fonte: Adaptado de Santos (2014)

Como discutido no capítulo 2.2 os eventos extremos podem ou não ser considerados desastres e serão condicionados pela presença de perigos, riscos e condições de vulnerabilidade. Quem reside nestas áreas de risco não escolheu por vontade própria conviver com as condições impostas pela natureza e, por vezes, não entende a situação potencial em que se encontra. Uma vez instalada uma comunidade ou uma região de risco faz-se necessário uma gestão voltada à segurança das pessoas. Cerri e Nogueira (2012) pontuam que nas áreas de assentamentos urbano precários há uma alta vulnerabilidade associada à forma ou localização inadequada da ocupação, pela ausência de infraestrutura urbana (drenagem, pavimentação, saneamento), de serviços básicos (coleta de lixo, redes elétrica e hidráulica, etc.) e pela degradação do ambiente. Além da necessidade de trazer infraestrutura e serviços básicos ao local os autores pontuam quatro tópicos essenciais à gestão de riscos, associados aos movimentos gravitacionais de massa:

- Identificação, análise e mapeamento das situações de risco, em escala adequada;
- Planejamento de intervenções estruturais para redução ou erradicação dos riscos;
- Monitoramento permanente e prevenção de acidentes, especialmente nos períodos críticos;
- Informação pública e capacitação para autodefesa e prevenção.

2.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

O mapeamento geotécnico tem diversas funcionalidades na gestão do território, é um tipo de documento cartográfico que visa fornecer informações a respeito do meio-físico em relação às mais diversas formas de uso e ocupação dos solos. Para Santos (2014) são quatro os tipos de documentos cartográficos orientados ao suporte das ações humanas no uso e ocupação do espaço, mapas de geodiversidade, mapas de suscetibilidade, cartas geotécnicas e cartas de risco, onde o fator distintivo entre elas é a escala de trabalho.

Para Diniz (1998) a cartografia geotécnica corresponde a um campo de interface interdisciplinar onde prevê-se o comportamento do meio-físico por meio de análise de dados

geológicos frente a ocupação antrópica. Ainda segundo o autor as cartas geotécnicas podem ser classificadas em três tipos principais segundo a sua aplicação em ordenamento territorial, em avaliação de processos do meio físico ou em estudos de implementação de empreendimentos (Quadro 4).

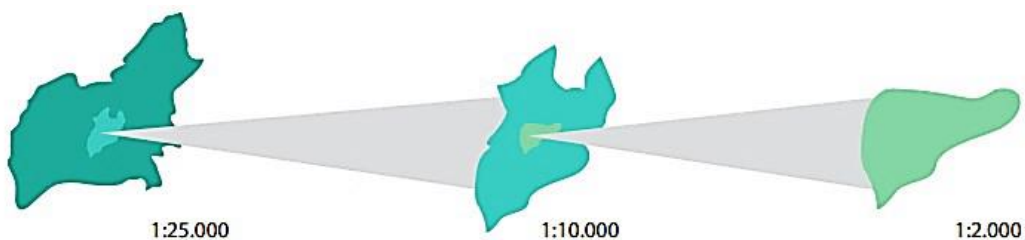
Quadro 4: Tipos de cartas geotécnicas

Classificação de Cartas Geotécnicas	
Planejamento regional e urbano	<ul style="list-style-type: none"> - Aptidão física ao uso do solo urbano - Aptidão física ao uso do solo agrícola
Suscetibilidade e riscos geológicos (processos do meio físico)	<ul style="list-style-type: none"> - Erosão - Escorregamento - Assoreamento - Inundação - Afundamento cárstico - Colapso de solo - Expansão de solo - Recalque de solo - Dinâmica costeira - Sismos
Viabilidade para implementação de empreendimentos (processos tecnológicos)	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrovia - Rodovias - Ferrovias - Duto vias - Uso e ocupação dos solos - Barragem - Indústrias - Aeroportos - Portos - Linhas de transmissão - Mineração

Fonte: Modificado de Diniz (1998)

Segundo Bitar *et al.* (2015) as cartas de suscetibilidade apresentam escalas menores, abrangendo a totalidade de um município, por exemplo. As cartas de aptidão a urbanização abrangem áreas desocupadas ou com urbanização incipiente dentro do perímetro urbano legal de um município e, por fim, as cartas de risco abrangem áreas urbanizadas de um município como bairros e setores residenciais, onde se verifica alta incidência de assentamentos precários, devem permitir decisões de campo precisas. A Figura 1 ilustra a determinação da escala para cartas de risco.

Figura 1: Grau de detalhe para cartas de risco



Fonte: Bitar *et al.* (2015)

2.4.1 Metodologias para o mapeamento geotécnico

Higashi (2006) define o mapeamento geotécnico como uma metodologia, em que sob forma de um mapa são representadas as principais características geomecânicas do solo, podendo ser utilizado na previsão do comportamento de polígonos de solos chamados de unidades geotécnicas, possibilitando a sua aplicação em projetos ambientais e de engenharia. As metodologias são diversas e possuem diferentes objetivos específicos e vêm sendo estudadas em diversos países.

O Quadro 5 resume algumas das metodologias mais importantes no cenário mundial, bem como nacional.

Quadro 5: Compilado de metodologias para o mapeamento geotécnico

Origem	Autor	Crítérios	Escala	Finalidade
Checoslováquia	Matula e Pasek (1964)	Morfologia, estabilidade dos terrenos, hidrologia e propriedades físico mecânicas dos solos e rochas.	1:25.000 -	Geral
França	Sanejouand (1972)	Dois tipos de cartas: De documentação – Substrato rochoso, materiais de cobertura, hidrogeologia e geomorfologia. De aptidão – Fundações, viabilidade de vias de transporte, jescavabilidade e materiais de construção.	<1:100.000 >1:2.000	Específica; Regional
Austrália (PUCE)	Aitchinson e Grant (1976)	Litologia, estrutura e tectônica do substrato, solo e vegetação.	<1:2.500.000 >1:2.500	Específica; Regional
Unesco	IAEG (1976)	Caráter das rochas e solos, hidrogeologia e geomorfologia.	<1:100.000 >1:10.000	Específica; Multifinalidade
Espanha	Farias <i>et al.</i> (1984)	Geomorfologia.	>1:200.000 <1:2.000	Específica; Regional
Brasil	Zuquette (1993) – EESC-USP	Topografia, substrato rochoso, materiais inconsolidados e hidrogeologia e hidrologia.	<1:50.000 >1:10.000	Específica; Regional
Brasil	IPT - Nakazawa <i>et al.</i> (1991); Prandini <i>et al.</i> (1995)	Litologia, morfologia e hidrologia	<1:50.000 >1:5.000	Específica; Regional
Brasil	Davison Dias (1995) - UFRGS	Pedologia, geologia e topografia.	-	Específica; Regional

Fonte: Compilação do autor (2022)

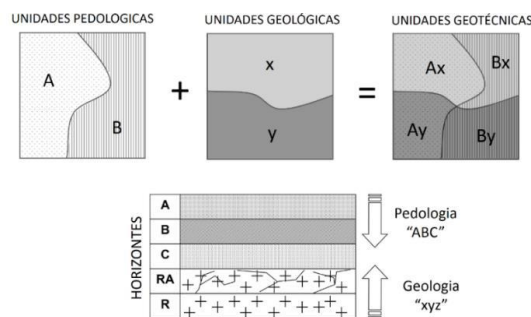
2.4.1.1 Mapeamento geotécnico de grandes áreas - Davison Dias (1995)

O conhecimento dos solos sob a ótica das diferentes ciências tem diferentes conotações. Para a agronomia destina-se a classificação dos mesmos com a finalidade principal de ressaltar características como a saturação base, em sódio e alumínio, por exemplo. Enquanto que, para a engenharia, prioriza-se as características que possam auxiliar em obras de engenharia, como a resistência ao cisalhamento, o comportamento hidráulico e mecânico. Sob as necessidades das diferentes ciências existem diferentes formas de se classificar os solos, sob diferentes perspectivas. Com esta visão, Davison Dias (1995) desenvolveu a metodologia de mapeamento geotécnico de grandes áreas. Segundo Higashi (2006) a metodologia demonstra ser uma forma abrangente de formular estimativas de unidades geotécnicas, com o objetivo de prever o comportamento do solo relacionando-o com a sua gênese.

De acordo com Davison Dias (1995) o estabelecimento das unidades geotécnicas tem por objetivo a definição de áreas homogêneas cujo comportamento geotécnico frente ao uso e ocupação dos solos é semelhante. A formulação destas unidades é feita através do cruzamento de um mapa litológico, oriundo da interpretação de um mapa geológico, de um mapa pedológico e outro topográfico indicando o limiar das unidades geotécnicas (Figura 2). Através da Geomorfologia, norteadada pela Pedologia, o mapa possibilita a modelagem de sequências topográficas típicas para cada região de estudo, baseada em curvas de nível e geologia local, levando-se em conta que existem variações dos tipos de solo de acordo com a declividade (HIGASHI, 2006).

A geologia infere sobre o horizonte saprolítico, ou seja, as características de alteração da rocha enquanto que a pedologia infere as características dos horizontes superficiais de um perfil típico e a topografia delimita o contato entre as unidades (DAVISON DIAS, 1995).

Figura 2: Definição das unidades geotécnicas.



Fonte: Thiesen (2016)

A união dos horizontes saprolíticos com os pedológicos gera as unidades geotécnicas, para tanto, Davison Dias (2001) definiu simbologias simplificadas para as diferentes unidades geológicas e pedológicas, apresentadas nos Quadro 6 e

Quadro 7 respectivamente.

Quadro 6: Siglas e classificações referentes às unidades geológicas.

Sigla	Nomenclatura	Sigla	Nomenclatura	Sigla	Nomenclatura
a	Arenito	g	Granito	br	Brecha
ag	Argilito	gl	Granulito	p	Pelito
an	Andesito	gn	Gnaisse	c	Conglomerado
ar	Ardósia	gd	Granitoide	q	Quartzito
b	Basalto	ma	mármore	ca	Calcáreo
r	Riolito	cm	Complexo Metamórfico	si	Sienito
cr	Carvão	s	Siltito	d	Diorito
sq	Sedimento Quaternário	da	Dacito	st	Sedimentos Terciários
f	Folhelho	x	Xisto	-	-

Fonte: Davison Dias (2001)

Quadro 7: Siglas e classificações referentes às unidades pedológicas.

Sigla	Nomenclatura	Sigla	Nomenclatura	Sigla	Nomenclatura
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados	AQ	Areia Quartzosa
PB	Podzólico Bruno-Acidentado	B	Brunizém	BV	Brunizém Vértico
PE	Podzólico Vermelho-Escuro	C	Cambissolo	PL	Planossolo
PV	Podzólico Vermelho-Amarelo	PLV	Planossolo Vértico	CB	Cambissolo Bruno
TR	Terra Roxa Estruturada	PT	Plintossolo	GH	Glei
LBC	Latossolo Bruno Câmbico	HO	Solo Orgânico	LA	Latossolo Amarelo
LBR	Latossolo Bruno-Roxo	LB	Latossolo Bruno	R	Litólico
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	TB	Terra Bruna-Estruturada	TBR	Terra Bruna-Roxa
TBV	Terra Bruna Podzólica	LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo	-	-	-	-

Fonte: Davison Dias (2001)

O método de mapeamento geotécnico de grandes áreas proposto por Davison Dias (1995) foi testado, validado e comprovado por diversos autores em teses, dissertações e trabalhos acadêmicos. Alguns autores a serem citados são Valente (1999), Higashi (2002), Miranda (2008), Reginatto (2013), Sbroglia e Higashi (2013), Sakamoto et al. (2015), Caraméz (2017).

2.5 ORIGEM E FORMAÇÃO DOS SOLOS

A formação dos solos se dá a partir do intemperismo das rochas, processo que pode ser desencadeado por ações físicas como a variação de temperatura, hidratação dos minerais constituintes da rocha mãe, entre outros. O intemperismo químico, ou decomposição, é gerado pela interação das rochas com o clima, com o relevo ou mesmo organismos ali presentes. Segundo Lepsch (2010) quando as rochas são expostas à atmosfera estas se tornam instáveis.

As rochas são constituídas por mais de um mineral, com coeficientes de dilatação distintos. As variações de volume provocadas pela diferença nos coeficientes de dilatação dos minerais geram trincas onde propicia-se o intemperismo químico por ação da água e de organismos que ali penetram.

Grotzinger e Jordan (2013) definem os solos como sistemas dinâmicos e respondem a mudanças climáticas, interação com organismos e perturbações por humanos. Para os autores cinco fatores são importantes para a sua formação e desenvolvimento:

- Material-Matriz – A solubilidade dos minerais, o tamanho dos grãos e os padrões de fragmentação como juntas e clivagens do substrato rochoso;
- Clima – Temperaturas, níveis de precipitação e os padrões de variação sazonais;
- Topografia – A declividade das encostas e a direção em que estão voltadas: encostas mais suaves voltadas para o sol promovem um melhor desenvolvimento do solo;
- Organismos – A diversidade e a abundância de organismos que vivem no solo;
- Tempo – A quantidade de tempo que um solo dispõe para se formar.

2.5.1 A morfometria como indicativo no mapeamento pedológico

De acordo com Moore *et al.* (1993), mapas de solo se tornaram ferramentas valiosas para o manejo dos recursos naturais, entretanto, estes métodos de mapeamento em campo não foram concebidos com o intuito de prover mapas com alta resolução espacial e continuidade.

Para Moore *et al.* (1993) dois problemas fundamentais surgem do mapeamento tradicional:

- As linhas desenhadas nos mapas de levantamento do solo podem não representar com precisão os limites entre as unidades do mapa;
- As homogeneidades inferidas não existem para muitos aspectos físicos e atributos químicos que afetam a modelagem ambiental e manejo específico do solo.

O mapeamento pedológico tradicional é criticado quanto ao seu caráter qualitativo, oneroso e demorado, fazendo com que novos métodos venham a ser estudados (LIMA, 2013; MOORE *et al.*, 1993). Os métodos utilizando a pedometria ou mapeamento digital do solo

(MDS) se utilizam de variáveis para predizer com algum grau de certeza a distribuição dos solos numa dada área. Sob esta perspectiva diferentes métodos foram e são estudados, como a utilização de lógica Fuzzy, redes neurais e técnicas de sensoriamento remoto como a composição colorida RGB de variáveis morfométricas (CATEN *et al.*, 2009; AMORIM, 2019; CHAGAS, 2006; HERMUCHE *et al.*, 2002).

Segundo Hermuche *et al.* (2002) a distribuição dos elementos quantificados que descrevem as paisagens apresenta propriedades que se agrupam em padrões homogêneos que caracterizam unidades fisiográficas e pedológicas. A espacialização das classes de solos apresenta-se ordenada nas paisagens com forte influência das variações morfométricas ao longo das vertentes. Pode-se então observar uma forte ligação de causa e efeito entre a topografia e a distribuição dos solos. Desta forma faz-se possível descrever a distribuição das classes de solo presentes em uma dada região de acordo com variáveis como declividade, área de contribuição, curvatura, aspecto, entre outras, extraídos de um modelo digital de terreno (MDT).

A lógica é que, em muitas paisagens, o desenvolvimento das topossequências se dá em resposta a maneira como a água se move através e sobre a paisagem (MOORE *et al.*, 1993). A resposta de como a água se move é controlada pelas variáveis topográficas como a declividade e curvatura, por exemplo.

Mühlethale *et al.* (2005) realizaram o mapeamento pedológico na bacia do Ribeirão da Pedreira – DF onde aplicaram o método da composição colorida RGB com as variáveis MDT, declividade e área de contribuição como variáveis explicativas da distribuição das classes pedológicas. A análise foi feita a partir dos histogramas e a comparação feita com o mapeamento da EMBRAPA. Para os autores a metodologia se mostrou uma alternativa viável, rápida e de baixo custo para o levantamento pedológico preliminar em bacias hidrográficas.

Hermuche *et al.* (2002) mapearam a bacia do Rio Jardim – DF também utilizando a técnica de composição colorida RGB e análise dos histogramas e, como variáveis explicativas, o MDT, a declividade e área de contribuição. Novamente a comparação feita foi com o mapeamento da EMBRAPA onde, segundo os autores, o trabalho alcançou com sucesso os objetivos propostos. A metodologia possibilitou a constatação de que o tipo de solo está diretamente ligado às características do relevo (HERMUCHE *et al.* 2002).

Silva *et al.* (2013) aplicaram a metodologia de Hermuche *et al.* (2002) na Bacia Hidrográfica do Rio Passaúna – PR, entretanto, a análise prosseguiu utilizando o método de

classificação supervisionado da Máxima Verossimilhança, utilizando como variáveis explicativas o MDT, declividade e área de contribuição. A constatação dos autores vai de encontro com o exposto por Hermuche *et al.* (2002) e consideraram a metodologia satisfatória, podendo servir de alternativa em caso de mapeamentos rápidos que não exijam detalhes precisos.

Ressalta-se que todos os três autores mencionados utilizaram como base das variáveis explicativas o MDT SRTM, com resolução espacial de 30m, e todos contavam com uma base de comparação com boa escala. Nenhum dos autores utilizou os mapeamentos como base para uma segunda análise como a geração de um mapa geotécnico para orientação de coleta de amostras para análise laboratorial ou para a análise da suscetibilidade ou probabilidade de ruptura em vertentes, por exemplo.

2.6 PROFUNDIDADE DO SOLO

A profundidade do solo (z) é uma propriedade importante na modelagem SHALSTAB e outras metodologias de estabilidade de encostas. Ela indica a profundidade máxima de ruptura do solo e faz parte fundamental do equacionamento do modelo, além de servir como base na estipulação da transmissividade do solo.

Rotineiramente autores que aplicam o SHALSTAB determinam profundidades críticas de ruptura, constantes para toda a bacia e testam quais dessas profundidades melhor se adequa ao inventário de cicatrizes da região. Todavia, profundidades homogêneas são fontes certas de incerteza, as bacias não têm sua profundidade homogêneas e variam de ponto a ponto, a depender das variáveis ambientais, como a declividade, o próprio tipo de solo, a curvatura ou mesmo a presença ou ausência de água. Ademais, os modelos de estabilidade mostram-se muito sensíveis a variação de z , como visto no trabalho de Michel (2013).

Partindo-se deste pressuposto, diversos autores tentam criar formulações que descrevam a espacialidade de z . Michel (2015) cita três tipos fundamentais de modelos para a definição da profundidade dos solos, os estatísticos, os empíricos e os baseados em processo – fisicamente embasados. Informações com maiores detalhes podem ser encontradas em sua tese.

Os modelos estatísticos são baseados no pressuposto de que uma combinação de fatores que definiu a ocorrência de certa profundidade do solo em determinado local também determinará a profundidade nos demais locais (MICHEL, 2015). De acordo com Gessler *et al.* (1995) a forma geral com que estes modelos são construídos é definida pela Equação (1).

$$S_i = f_i(\text{declividade}, \text{posição na bacia}, \text{radiação solar}, \dots) \quad (1)$$

Onde S é um atributo individual do solo (ex. profundidade do solo, pH, etc); f é uma função de um ou vários atributos ambientais; e i é o domínio fisiográfico caracterizado por condições ambientais comuns.

Por sua vez, os modelos empíricos podem ser considerados os mais simplistas, visto que muitas vezes se baseiam apenas na relação observada entre um determinado parâmetro e uma variável desejada. Ainda que sejam mais simplistas, muitas vezes podem gerar resultados melhores e mais adequados do que aqueles mais robustos e sofisticados (MICHEL, 2015). O autor cita o trabalho de Saulnier et al. em 1997, onde os mesmos desenvolveram duas equações empíricas que descrevem em funções lineares o z. A primeira, apresentada na Equação (2) é uma função linear decrescente da altitude e a segunda uma função linear decrescente da declividade Equação (3)

$$z_i = z_{max} - \left(\frac{z_{max} - z_{min}}{e_{max} - e_{min}} \right) \cdot (e_i - e_{min}) \quad (2)$$

Onde z_i é a profundidade do solo em determinado ponto; e_i é a elevação no mesmo ponto; z_{max} e z_{min} são os valores máximos e mínimos, respectivamente, para a profundidade do solo; e e_{max} e e_{min} são os valores máximo e mínimo, respectivamente, para a elevação da bacia.

$$z_i = z_{max} - \left(\frac{z_{max} - z_{min}}{\tan \theta_{max} - \tan \theta_{min}} \right) \cdot (\tan \theta_i - \tan \theta_{min}) \quad (3)$$

Onde θ_{max} e θ_{min} são as declividades máximas e mínimas da bacia, respectivamente; θ_i é a declividade da encosta em determinado ponto

A Equação (3) tenta descrever a profundidade do solo em termos de propensão à ocorrência de erosão. Pontos de declividade mais acentuada tendem a demonstrar maiores potenciais erosivos, consequentemente criando profundidades menores do solo, enquanto que, zonas de baixa declividade são propícias à deposição, apresentando profundidades maiores (MICHEL, 2015).

Outros modelos a serem comentados são o Sexp, GIST e sGIST (CATANI *et al.*, 2010; MICHEL, 2015).

Nesta dissertação foi, entretanto, utilizado o modelo proposto por Moore et al. (1993). Os autores averiguaram a influência de variáveis topográficas na formação dos solos e

também como possíveis variáveis explicativas de alguns atributos dos solos, um deles é a profundidade z . Em seu trabalho foram realizadas regressões lineares no formato *stepwise*, considerando dois níveis de significância para as variáveis – 0,01 e 0,05. Os autores aplicaram a análise em uma localidade no noroeste do Colorado – EUA, onde haviam dados de profundidade do solo para 231 pontos no terreno, com espaçamento de 15,24m entre eles.

Para cada passo da regressão relacionaram a profundidade do solo com variáveis ambientais como a declividade, índice topográfico de umidade (*topographic wetness index* – TWI), índice de potência de fluxo (*stream power index* – SPI), aspecto, curvatura plana, curvatura em perfil, entre outras. Após o processo de regressão foi constatado que, no nível de significância 0,01, a declividade e o TWI foram as variáveis que melhor explicaram a profundidade dos solos. Ao tomarem a significância de 0,05 outras variáveis como a curvatura em perfil e plana se mostraram importantes. As regressões explicaram entre 41% e 64% da variabilidade dos atributos avaliados, considerado um bom resultado pelos autores.

O TWI refere-se à variável topográfica hidrológica que indica a tendência de a água acumular em qualquer ponto da área de captação, bem como a tendência da gravidade em forçar a água a descer a encosta (POURGHASEMI *et al.*, 2012).

A correlação entre estas variáveis com os atributos do terreno, como a profundidade do solo, suporta a hipótese de que a catena do solo se desenvolve em resposta ao modo como a água permeia e percorre o terreno (MOORE *et al.*, 1993).

Os autores assumiram uma relação linear entre os atributos do solo e as variáveis ambientais, gerando as Equações 4^a e 4^b e demonstraram que estas equações são comparáveis com às da regressão linear. A primeira é aplicada para variáveis positivamente correlacionadas e a segunda para as negativamente correlacionadas.

$$y_p = y_{imin} + (y_{imax} - y_{imin}) \cdot \sum_{k=1}^n \left(\frac{T_k - T_{kmin}}{T_{kmax} - T_{kmin}} \cdot u_k \right)_i \quad (4^a)$$

$$y_p = y_{imin} + (y_{imax} - y_{imin}) \cdot \sum_{k=1}^n \left(\left[1 - \frac{T_k - T_{kmin}}{T_{kmax} - T_{kmin}} \right] \cdot u_k \right)_i \quad (4^b)$$

Onde y_p é o atributo do solo a ser modelado no ponto i ; y_{imax} e y_{imin} são os valores máximos e mínimos respectivamente do atributo (constatados em campo); T_k é uma variável ambiental; T_{kmax} e T_{kmin} são os valores máximos e mínimos da variável ambiental; u_k é um coeficiente

de peso que pode ser determinado de diversas formas, arbitrariamente ou uma fração da variância da variável, por exemplo ($\sum u_k = 1$); n é o número de variáveis ambientais consideradas.

2.7 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

Os ensaios geotécnicos são absolutamente necessários em projetos, planejamentos e situações em que se necessite trabalhar com solos e rochas. Segundo Terzaghi *et al.* (1996) o sucesso para qualquer projeto se baseia em análises, sejam elas de campo ou laboratório. De acordo com Espíndola (2011), os ensaios de laboratório têm a função de simular ao máximo a situação de campo, sempre prezando pela integridade da amostra. Neste contexto, existe uma grande variedade de ensaios, alguns para a caracterização física dos materiais, outros para a determinação da compressibilidade, da condutividade hidráulica, da resistência ao cisalhamento, entre outros.

No estudo de movimentos gravitacionais de massa os ensaios que se destacam são os de resistência ao cisalhamento, pois possibilitam definir parâmetros que influenciam diretamente na estabilidade da encosta, como será visto em capítulos seguintes. Os ensaios de caracterização física dos solos, como a granulometria e o índice de plasticidade e ensaios para determinação do comportamento hidráulico dos solos, como a determinação de poropressões e da condutividade hidráulica são igualmente importantes.

2.7.1 Caracterização física dos solos

Solos são sistemas trifásicos, constituídos por sólidos, vazios, gases e/ou líquidos. Estes solos são caracterizados a partir de suas granulometrias, nomeadamente argilas, silte, areias, pedregulhos, pedras de mão e matações.

Segundo Lambe e Whitman (1969) os matações e pedras de mão são considerados componentes muito estáveis, podendo ser usados para estabilizar encostas. Quanto mais angulosos, maior a estabilidade que proporcionam. Já os pedregulhos e areias possuem essencialmente as mesmas propriedades frente à engenharia. São fáceis de compactar e pouco afetados pela umidade. Os matações tendem a ser mais resistentes à erosão e “*piping*” se comparados com as areias. As areias finas e uniformes tendem a se comparar às características do silte tendo um decréscimo na permeabilidade e redução da estabilidade com o aumento da umidade. Os siltes são naturalmente instáveis, particularmente quando se aumenta o conteúdo de água. Trata-se de um material relativamente impermeável, de difícil

compactação, facilmente erodível e sujeito a “*piping*”. Por fim, a característica distintiva da argila é a sua coesão, que aumenta com o decréscimo do conteúdo de água presente no solo. O material possui uma permeabilidade muito baixa, de difícil compactação quando saturada. Quando compacta é resistente a erosão e “*piping*” e é um material sujeito a expansão e contração.

Ainda com relação a caracterização física dos solos há o ensaio granulométrico para determinação das granulometrias. No Brasil este ensaio é regido pela ABNT NBR 7181 (2016), o qual protocola a distribuição dos grãos em função de sua dimensão.

O ensaio é dividido em duas etapas, o primeiro, de peneiramento, onde passa-se o solo por peneiras padronizadas com diferentes diâmetros. Segundo Pinto (2006) a abertura nominal da peneira é considerada como o “diâmetro das partículas” e, relacionado a essa abertura, o autor apresenta uma limitação para o ensaio, a abertura nunca vai ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse.

A segunda etapa é a determinação da porção fina do solo, abaixo de 0,075mm, através da sedimentação. Este ensaio se baseia na lei de Stokes onde a velocidade de queda de partículas esféricas num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material, do fluido, da viscosidade do fluido e do diâmetro da partícula (PINTO, 2006).

A Tabela 1 apresenta alguns valores granulométricos adquiridos através da literatura para os solos estudados neste trabalho. Para simplificação, os valores da granulometria de areia foram unidos em uma única coluna.

Tabela 1: Frações granulométricas dos solos estudados neste trabalho retirados da literatura.

Unidade Geotécnica	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Peso Específico (g/cm ³)	Fonte
Ca,s	44,24	40,33	15,43	1,68	Alves (2018)
Ca	47,5	29	23,5	1,84	Sbroglia (2015)
Ca	74,63	13,03	12,34	1,37	Almeida (1998)
Ca	78,2	8,16	13,64	1,44	Almeida (1998)
Ca	55	14,21	30,79	1,49	Almeida (1998)
Cde	62	12	26	1,84	Ziegler (2013)
Cde	70	12	18	1,84	Ziegler (2013)
Cde	45,8	20,2	34	-	Sbroglia (2015)
Cde	32,82	19,46	47,72	1,78	Alves (2018)
Ra	80	6	14	1,84	Ziegler (2013)
Ra	95,4	2,3	2,3	1,57	Bartolomeu (2009)
Ra	82,49	16,46	1,05	1,65	Cunha (2015)
Ra	86,63	9,77	3,6	1,69	Cunha (2015)

PVa	84,54	10,19	5,27	1,65	Cunha (2015)
PVa	74,82	12,11	13,07	1,56	Cunha (2015)
PVa	74	26	0	1,71	Orlandini (1991)
PVa	64	22	14	1,89	Pinheiro (1995)

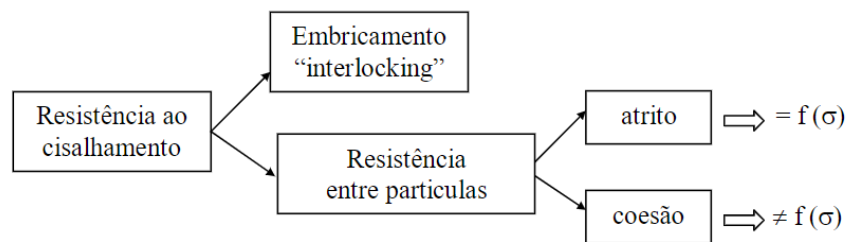
*Consultar as nomenclaturas das unidades geotécnicas nos Quadro 6 e Quadro 7.

2.7.1 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento controla a estabilidade dos solos e rochas. De acordo com Terzaghi *et al.* (1996) esta propriedade governa a estabilidade das encostas e a dinâmica dos movimentos gravitacionais de massa. Para Flach (2020) a resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área unitária que essa massa pode oferecer para resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior.

Segundo Gerscovich (2010) a resistência ao cisalhamento é função de dois componentes, o embricamento e a resistência entre partículas (Figura 3).

Figura 3: Componentes que governam a resistência ao cisalhamento.



Fonte: Gerscovich (2010)

O embricamento, segundo a autora, é o trabalho necessário para movimentar uma dada partícula no sentido ascendente. Quanto mais denso o solo maior será a parcela de *interlocking* e, portanto, maior a resistência do solo.

Para Pinto (2006) a ruptura dos solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento. A definição da resistência ao cisalhamento se dá a partir da máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura ocorrer. Existem diversos critérios para determinar a resistência ao cisalhamento, alguns estabelecem máximas tensões de compressão, outros de tração e outros ainda de cisalhamento.

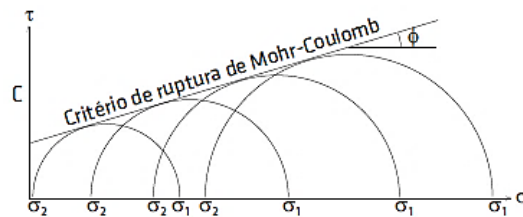
2.7.1.1 Critério de Ruptura de Mohr Coulomb

Segundo Oliveira (2004) a experiência tem mostrado que, para a maioria dos solos, a estabilidade pode ser estimada com base no critério de Möhr-Coulomb, expresso em termos de tensões efetivas. Os solos rompem, sendo esse fenômeno devido ou pela tensão atuante ou

pelas forças cisalhantes. Para Terzaghi *et al.* (1996) o rompimento devido às forças cisalhantes começa em alguma superfície que passa pelo ponto em que há a combinação crítica das forças cisalhantes e tensões normais.

Fiori (2015) define o critério de Möhr-Coulomb (Figura 4) como uma reta envelope a qual tangencia o círculo de Möhr, que representa as condições críticas de combinações dos esforços principais.

Figura 4: Critério de ruptura de Möhr-Coulomb.



Fonte: Fiori (2015)

Segundo Pinto (2006) o critério de Coulomb evidencia que não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão $c + \phi \cdot \sigma$, onde c e ϕ são constantes do material representando, respectivamente, a coesão e o ângulo de atrito interno e σ a tensão normal existente no plano de cisalhamento.

O critério de Möhr, ainda segundo o autor, expressa que não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura, observados experimentalmente para o material.

Terzaghi *et al.* (1996) postula que a linha de ruptura de uma série de testes geralmente deveria ser curva, seguindo o critério de Möhr mas, utilizando-se da Equação (5), é possível aproximar um segmento da curva a uma reta que tangencia as tensões de ruptura. Dessa forma a equação fornece a resistência ao cisalhamento τ a partir de outros dois coeficientes, a coesão c e o ângulo de atrito interno ϕ :

$$\tau = \tan\phi \cdot \sigma + c \quad (5)$$

2.7.1.2 Parâmetros de Resistência

Para Caputo (1988) a propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade depende da resistência ao cisalhamento, que por sua vez é governada por dois parâmetros: A coesão e o ângulo de atrito interno.

Segundo Gerscovich (2010) o mecanismo de atrito entre as partículas é análogo à lei de Coulomb, como visto anteriormente, e define a resistência ao deslizamento de um corpo

rígido sobre uma superfície plana. No momento do deslizamento a tensão tangencial se iguala a resistência ao cisalhamento. Para Silva e Carvalho (2007) este parâmetro é o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. Segundo Caputo (1988) não há nos solos uma superfície nítida de contato, mas sim uma infinidade de contatos pontuais entre os grãos.

Caputo (1988) diferencia duas coesões distintas, a denominada “aparente” e a “verdadeira”. A primeira se deve a pressão capilar da água contida nos poros dos solos, a qual age como uma pressão externa. Para Terzaghi *et al.* (1996) está coesão “aparente” é um efeito mecânico devido ao contato de umidade nos solos e depende da sua densidade relativa. É por causa deste efeito que declividades verticais de alguns poucos metros conseguem se manter sem suportes laterais. Já a segunda se dá devido às forças eletroquímicas de atração entre as partículas de argila. Segundo Sbroglia (2015) a coesão verdadeira pode ainda ser resultado da cimentação proporcionada por sílicas, carbonatos e óxidos, presentes nos contatos entre os grãos do solo, podendo apresentar diversas origens como de processos pedogenéticos, processos deposicionais ou herdada da rocha de origem.

São apresentados na Tabela 2 alguns valores referentes às resistências ao cisalhamento de unidades geotécnicas que compõem a área de estudo deste trabalho.

Tabela 2: Valores de resistência ao cisalhamento dos solos estudados neste trabalho, retirados da literatura.

Unidade Geotécnica	Coesão (kN/m²)	Ângulo de Atrito Interno (°)	Local	Fonte
Ca	8,42	26,5	Morro do Baú	Sbroglia (2015)
Ca,s	10,2	26,4	Blumenau	Alves (2018)
Ca	3,6	42,9	Porto Alegre	Bastos (1999)
Ca,s	11,8	32	Blumenau	Alves (2018)
Cde	19,4	26	Blumenau	Alves (2018)
Cde	11,6	27,7	Blumenau	Müller (2015)
Cde	12,6	27,8	Timbé do Sul	Feuerharmel (2000)
Cde	9,2	33	Rodeio	Müller (2015)
Ra	1,5	32,02	Faxinal do Soturno	Zanon (2021)
Ra	5	28	Rosário do Sul	Pinheiro (1991)
Ra	5	35	São Leopoldo	Specht (2000)
PVa	2,4	27,1	Novo Hamburgo	Bastos (1999)
PVa	6,1	26	Novo Hamburgo	Orlandini (1991)

PVa	8,4	33	Timbé do Sul	Pereira (2006)
PVa	8,7	35,5	Novo Hamburgo	Bastos (1999)

2.7.1 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (k) tem um papel bastante importante nos MGM, de acordo com Fernandes *et al.* (2001) essa importância se dá tanto na recarga da água superficial, ou seja, a velocidade com que a água infiltra no solo, quanto na geração de descontinuidades hidráulicas no interior do perfil de alteração. Essas descontinuidades hidráulicas podem atuar localmente como camadas de impedimento ao fluxo vertical, favorecendo a geração de elevadas poro-pressões positivas.

A partir do momento em que o solo fica completamente saturado a condutividade hidráulica é considerada saturada, denota-se k_s . Segundo Hillel (1998) em solos saturados e de estrutura estável, ou em meio poroso rígido, como os arenitos, a condutividade hidráulica tende a se aproximar de valores constantes. A Tabela 3 resume os valores de k_s para alguns solos.

Tabela 3: Valores de condutividade hidráulica saturada referenciais. d é o diâmetro das partículas e h_c é a altura do aumento de capilaridade

Solo	k_s (m/s)	d (mm)	h_c (m)
Argila	$10^{-10} - 10^{-8}$	< 0,002	2 - 4
Silte	$10^{-8} - 10^{-6}$	0,002 - 0,05	0,7 - 1,5
Areia	$10^{-5} - 10^{-3}$	0,05 - 2	0,12 - 0,35
Cascalho	$10^{-2} - 10^{-1}$	> 2	-

Fonte: Hillel (1998)

O autor supracitado ainda afirma que a condutividade hidráulica depende não só da porosidade total, mas, principalmente, do tamanho dos poros que conduzem a água. Um solo de granulometria arenosa com grandes poros terá uma condutividade maior do que um solo siltoso ou argiloso, independente de as argilas geralmente serem mais porosas na totalidade do que as areias.

De acordo com Mesquita e Moraes (2004) a k_s depende, em grande parte, da forma e continuidade dos poros, estas que variam fortemente de um local para o outro. A forma e continuidade diferem também para as distintas orientações dos solos, podendo levar a assimetria. Para os autores os maiores valores de k_s são encontrados em solos mais densos, provavelmente refletindo a importância da continuidade dos macroporos para o fluxo de água na saturação. Uma fonte de variabilidade é justamente a densidade do solo, que implica

diretamente na variabilidade da condutividade, os diferentes manejos do solo alteram a densidade do solo fazendo com que este parâmetro seja altamente inconstante.

Portanto, a condutividade hidráulica não é uma propriedade do solo por si só, pelo contrário, ela depende de variados atributos do solo e do líquido que o permeia. As características do solo que afetam a k_s são a porosidade total, a distribuição do tamanho dos poros e a geometria dos poros. Já para os fluidos os atributos que a afetam são a densidade e a viscosidade (HILLEL, 1998)

De acordo com Ohta *et al.* (1985) o valor de k_s na modelagem hidrológica pode ser considerado uma ordem de grandeza maior do que o valor medido ou estimado. A razão disto é a possível formação de fluxos preferenciais na camada de solo, que aumentarão drasticamente a condutividade real (apud MICHEL *et al.*, 2021, p. 829). Fernandes *et al.* (2001) discutem analogamente que a condutividade hidráulica medida em campo é superior àquela medida em laboratório para solos arenosos, enquanto que o oposto pode ser observado em solos argilosos.

Existem diversas formas de se medir ou estimar o valor de k_s podendo ser em laboratório, em campo ou através de relações empíricas. Os ensaios de campo têm a vantagem de considerar uma maior área de influência e levam em consideração as heterogeneidades e anisotropia, enquanto que os de laboratório são reféns de pequenas amostras do todo, dependentes também da maneira com que a coleta da amostra foi feita, a fim de não desestruturar a geometria interna do solo. Pode-se citar como métodos de campo o Piezocone (CPTu), *slug test* e as sondas porosas. Em laboratório alguns métodos são os de carga constante e *outflow-inflow* (vazão de saída/entrada).

Como métodos indiretos, ou de relações empíricas podem ser citados Shepherd (1989), Hazen (1911) e Zhang e Schaap (2017). Os dois primeiros utilizam fórmulas empíricas baseadas no diâmetro dos grãos e constantes matemáticas para a determinação da condutividade hidráulica, já o terceiro, que será utilizado neste trabalho, utiliza funções de pedotransferência, o Rosetta 3. O código é baseado em redes neurais artificiais e possui uma versão *on-line* que pode ser acessada através do link: <https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal/rosetta>. Zhang e Schaap (2017) melhoraram a versão inicial do código, intitulada *Rosetta Lite Version 1.1* (SCHAAP *et al.*, 2001), unificando os submodelos de retenção de água e condutividade hidráulica da versão inicial, além de o novo modelo ter menos *bias*, uma melhor performance e acurácia da distribuição dos parâmetros. Vale

ressaltar que a estrutura matemática da Rosetta nunca foi publicada, mas sim uma GUI, ou *software*, para a utilização.

Os dados de entrada obrigatórios requeridos pelo modelo são a porcentagem de areia, silte e argila. Como opção pode-se ainda informar a densidade do solo (g/cm^3) e o conteúdo volumétrica de água (cm^3/cm^3), gerando como resultado a estimativa de k_s (cm/dia). Alguns estudos que utilizaram o modelo Rosetta para as determinações de k_s são Michel *et al.* (2021), Michel (2015) e Sousa (2013).

Na Tabela 4 são apresentados valores de condutividade hidráulica saturada retirados da literatura para as unidades geotécnicas estudadas neste trabalho.

Tabela 4: Valores de condutividade hidráulica saturada para as unidades geotécnicas deste trabalho.

Unidade Geotécnica	k_s (m/dia)	$k_{s,\text{máximo}}$ (m/dia)	$k_{s,\text{mínimo}}$ (m/dia)	Fonte
Ca	0,37152			Sbroglia (2015)
Ca,s	0,0716*			Alves (2018)
Ca	0,893*	4,99*	0,0101*	Almeida (1998)
Ca	0,8758*			Almeida (1988)
Ca	0,161*			Almeida (1988)
Cde	0,5642			Feuerharmel (2007)
Cde	0,0332*	0,5642	0,0181*	Ziegler (2013)
Cde	0,0654*			Ziegler (2013)
Cde	0,0181*			Alves (2018)
Ra	1,2584			Cunha (2015)
Ra	1,5645	8,3701*	0,1104	Cunha (2015)
Ra	7,6236*			Bartolomeu (2009)
Ra	0,7872*			Pedron (2011)
PVa	1,1625*			Cunha (2015)
PVa	0,44352	3,4298*	0,005*	Cunha (2015)
PVa	1,0709*			Orlandini (1991)
PVa	0,64584			Cunha (2015)

* Valores estimados usando granulometrias, densidade do solo e o Rosetta 3; $k_{s,\text{máximo}}$ é o maior k_s encontrado para a unidade na literatura; $k_{s,\text{mínimo}}$ é o menor k_s encontrado para a unidade na literatura.

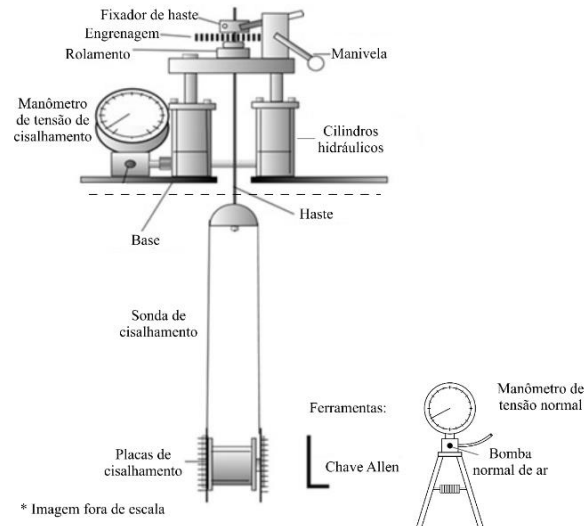
2.7.1 Ensaio Borehole Shear Test (BST)

Existem diversos ensaios para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos, alguns a serem citados são o Cisalhamento Direto, Compressão Triaxial, Penetração Estática do Cone (CPT) e *Vane Shear Test*.

O BST (Figura 5) foi desenvolvido pelo Dr. Richard Handy e colaboradores em 1960 com o objetivo de determinar os parâmetros de resistência dos solos. Segundo Lutenecker

(2021), o equipamento foi desenvolvido com o intuito de medir *in situ* a resistência ao cisalhamento drenada de solos através de uma série de testes de cisalhamento direto nas paredes de um furo de sondagem. Ainda segundo o autor o teste representa um conceito simples que fornece resultados que podem ser diretamente utilizados em projetos geotécnicos.

Figura 5: Equipamento *Borehole Shear Test*



Fonte: Flach (2020)

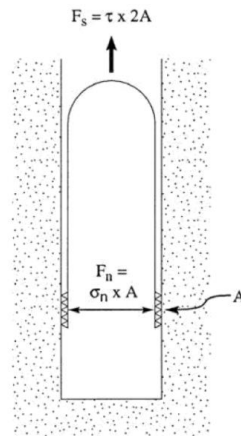
Segundo Flach (2020) o equipamento é dividido em duas partes a base onde encontra-se o medidor da tensão cisalhante, conectado a um manômetro e uma manivela para que se possa transmitir o esforço necessário para a determinação da tensão. Para que se possa transmitir o esforço, a base se liga à sonda por meio de hastes metálicas presas a um fixador.

Ainda como descrito por Flach (2020), a segunda parte do equipamento é a sonda cisalhante, a qual faz contato direto com o solo, com um diâmetro total de 85mm. É na sonda que as placas de cisalhamento estão posicionadas, as quais possuem ranhuras horizontais para melhor aderência ao solo. A força normal para que se possa consolidar o material a ser testado é aplicada através de um dispositivo no centro da sonda, a qual recebe a aplicação de força através de uma bomba manual de ar, com um manômetro acoplado.

Conforme Lutenecker (2021) a condução do ensaio se inicia com a execução de um furo a trado no solo até a profundidade desejada, determinada de acordo com o horizonte pedológico de interesse. O furo deve ter um diâmetro entre 69mm e 79mm (FLACH, 2020). Feito isto, insere-se a sonda cisalhante e, uma vez devidamente posicionada, aplica-se uma força normal a partir da bomba manual de ar para que se inicie o processo de consolidação do solo, a Figura 6 esquematiza a sonda no interior de um poço onde será feita a consolidação do

solo. Flach (2020) cita que o tempo de consolidação é de 15 minutos e que, após este período, deve ser verificado se houve diminuição da tensão normal.

Figura 6: Sonda BST posicionada em um furo de sondagem.

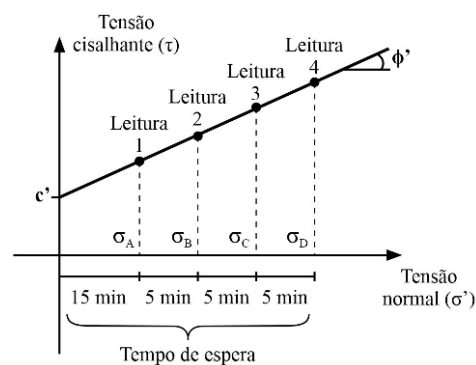


Fonte: Lutenegger (2021)

Segundo Flach (2020), após a etapa de consolidação, deve-se girar a manivela situada na base do equipamento no sentido horário, mantendo-se constância de 2 giros por segundo. Será possível acompanhar no manômetro o registro da tensão cisalhante do solo, sendo que o pico registrado indica a máxima resistência ao cisalhamento do solo.

Flach (2020) ainda menciona que o processo acima descrito deve ser repetido para uma faixa de tensões normais, a placa de cisalhamento não deve ser reposicionada para cada iteração. A Figura 7 ilustra a envoltória de cisalhamento construída a partir das tensões de cisalhamento normais e picos de medida.

Figura 7: Envoltória de cisalhamento BST.



Fonte: Flach (2020)

Os trabalhos utilizando o BST para a aquisição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos ainda são poucos, apesar dos bons resultados entregues pelo método. Lutenegger (2021) compila diversos trabalhos que aplicaram o BST para diferentes estudos, como a estabilidade de taludes, fundações profundas, ancoragens e estabilidade de margens de

rios e riachos. No Quadro 8 são compiladas as referências do autor bem como outras mais recentes para o estudo da estabilidade de taludes.

Quadro 8: Referências de estudos utilizando o BST.

Aplicação	Referências
Estabilidade de Taludes	Handy e Williams (1967) Lohnes e Handy (1968a) Tice e Sams (1974) Little <i>et al.</i> (1982) Ruenkrairergsa e Pimsarn (1982) Handy (1986) Yang <i>et al.</i> (2006) Farouz <i>et al.</i> (2007) Sakamoto <i>et al.</i> (2015) Degering (2018) Zimmermann (2019) Flach (2020)

Fonte: Adaptado de Luteneegger (2021)

2.7.1 Incerteza na geotecnia

Na geotecnia há a constante preocupação com a representatividade dos dados coletados em campo, nunca será possível coletar um número suficiente que explique toda a variabilidade da região. Nunca será possível avaliar experimentalmente todos os pontos que representam um terreno e, portanto, há incerteza envolvida.

As propriedades físicas podem ser medidas com relativa facilidade em laboratório e uma pequena variação de seus valores não modifica substancialmente o comportamento e o equilíbrio dos solos. Entretanto, deve-se ter em conta que elas podem variar muito em função de condições externas, como, por exemplo, quantidade de chuva, ocupação antrópica, etc. Da mesma forma, as propriedades mecânicas podem variar de forma sensível com o tempo, método de análise e condições externas. Uma pequena variação de seus valores pode influir consideravelmente na distribuição dos esforços e na natureza do equilíbrio, modificando radicalmente a segurança dos implantes ou obras (FIORI, 2015).

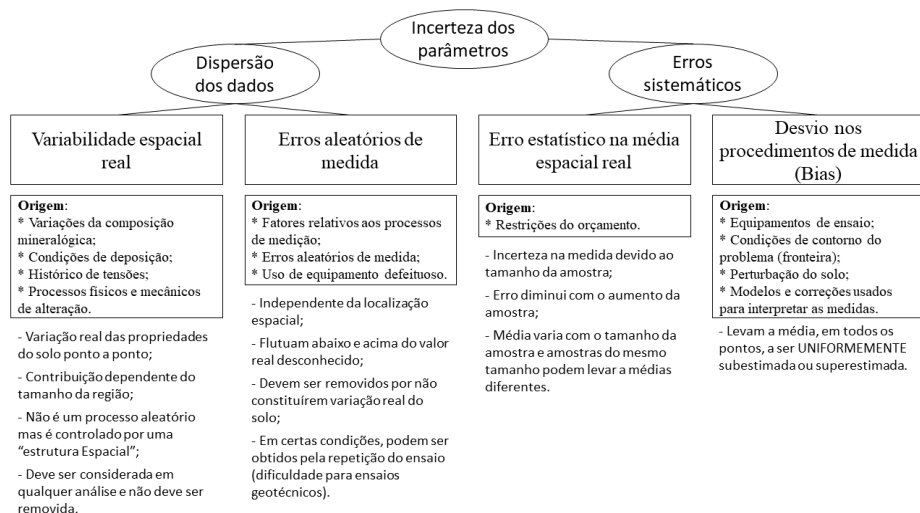
Segundo Corominas *et al.* (2011) o grau de incerteza é condicionado por diversos fatores, como o tempo e recursos financeiros para a coleta de dados, o tamanho da área de estudo, a experiência de quem está analisando o local e a existência e credibilidade de mapas pré-existentes para condicionar as análises. Com base nestes fatores pode-se observar que o grau de incerteza é função, ou de limitação de dados, ou de interpretações subjetivas.

Ainda segundo Corominas *et al.* (2011) alguns dos fatores com maior grau de incerteza são a variabilidade espacial, informação geotécnica detalhada e também a profundidade do solo, nível piezométrico, estrutura das rochas e aceleração sísmica, informações estas que só podem ser adquiridas com precisão para pequenas áreas. Isto se deve pois são necessários demasiados pontos amostrais para que se possa modelar a variabilidade espacial destes fenômenos.

Com relação aos parâmetros de entrada em modelos, por exemplo dados de resistência ao cisalhamento, Costa (2005) discute a dispersão dos mesmos em torno da média, composta pela variabilidade espacial inerente e pelos erros aleatórios dos ensaios. Outro fator importante de incerteza é o erro sistemático associado ao desvio da tendência média observada em relação ao valor real desconhecido. Este erro sistemático é dividido em dois tipos, o estatístico na tendência média (*trend*), devido ao tamanho limitado da amostra e desvio nos procedimentos de medida (*bias*), quando a propriedade medida é super, ou subestimada uniformemente em todos os pontos dos ensaios. A Figura 8 apresenta fontes de incerteza nos parâmetros geotécnicos.

Ainda segundo Costa (2005) a variabilidade espacial não é um processo aleatório, ela é controlada por alguma forma de correlação que relaciona as propriedades do solo com sua localização no espaço. Em termos estatísticos, esse fenômeno é conhecido como estrutura espacial.

Figura 8: Incertezas associadas a geotecnia.



Fonte: Adaptado de Costa (2005)

2.8 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA (MGM)

Movimentos gravitacionais de massa são comuns na natureza e são deflagrados por processos naturais como a chuva, terremotos e degelo, por exemplo. Esses movimentos tendem a se concentrar em regiões montanhosas, de relevo acidentado. Por vezes, entretanto, podem deflagrar em situações menos esperadas, por condicionantes extremos, como precipitações anômalas, sismos ou intervenções antrópicas.

Como visto, a resistência ao cisalhamento controla a estabilidade dos solos e rochas, a instabilidade ocorre quando a resistência ao cisalhamento é insuficiente para contrabalançar as forças que agem para causar o movimento em qualquer superfície da encosta. Encostas naturais que estiveram estáveis por vários anos podem subitamente desabar (CHOWDHURY, 1978). Para o autor são diversos os possíveis agentes deflagradores, discutidos brevemente a seguir.

- Distúrbios externos devido a cortes ou preenchimentos de partes da encosta ou porção de terra adjacente a ela, podendo resultar em uma alteração no balanço de forças que tendem à instabilidade versus as estabilizadoras;
- Distúrbios externos na forma de atividade sísmica;
- Incremento nas poropressões no interior da encosta devido a mudanças significativas em áreas no entorno da mesma, como o desmatamento, preenchimento de vales, distúrbios nas características naturais de drenagem, urbanização, construção de reservatórios, volume pluviométrico excepcional, entre outros;
- Incremento nas poropressões vários anos após a execução de um corte;
- Progressivo decréscimo na resistência ao cisalhamento dos materiais, podendo ser por deformações significativas que à priori não causam uma instabilidade, mas podem levar a ela. Essas deformações podem ocorrer devido a contínua ação das forças gravitacionais, insuficientes para causar uma instabilidade completa. Na maioria dos casos as deformações ocorrem em zonas de descontinuidade, zonas antigas de falha e zonas de cisalhamento tectônicas no interior das encostas.
- Mudança progressiva no campo de stress no interior das encostas: Toda formação geológica natural possui um campo de stress “inicial”, o qual depende do seu histórico. Uma mudança nesse campo de stress inicial pode ocorrer devido a causas similares às que produzem decréscimo na resistência ao cisalhamento.
- Intemperismo. É importante considerar não somente o intemperismo que ocorreu no passado, mas também a possibilidade de continuação e até mesmo aceleração deste processo. O intemperismo em solos e rochas destrói as conexões inter partículas e reduz a resistência ao cisalhamento dos materiais.

Como visto, são diversos os possíveis agentes deflagradores de movimentos gravitacionais de massa e estes podem ser classificados em diferentes categorias. Baseado na atividade do movimento; na velocidade de deslocamento do material; segundo o tipo de material compondo o movimento; segundo a geometria da encosta ou segundo ou a presença

ou ausência de água (CRUDEN; LAN, 2015; FERNANDES; AMARAL, 2000; GERSCOVICH, 2012; GUERRA; MARÇAL, 2006; IPT, 1991; VARNES, 1978; PINTO *et al.*, 2012; CORTELETTI, 2017).

A classificação de Varnes (1978), a qual se baseia primeiramente no tipo de movimento e, em segunda instância, no tipo de material transportado, é uma das mais utilizadas na literatura e é apresentada brevemente no Quadro 9.

Quadro 9: Tipos de movimentos gravitacionais de massa segundo Varnes (1978)

Tipo de movimento	Tipo de material		
	Rocha	Material detrítico grosseiro	Solos
Queda – Falls	Queda de blocos	Queda de detritos	Queda de solos
Tombamentos – Topples	Tombamento de blocos	Tombamento de detritos	Tombamento de solos
Escorregamentos	Rotacional	Escorregamento de rochas	Escorregamento de detritos
	Translacional		
Corrida – Flows	Avalanche de blocos	Corrida de detritos	Corrida de solo - ou lama
Espalhamento	Espalhamento de rochas	Espalhamento de detritos	Espalhamento de Solos
Complexos	Combinação de dois ou mais tipos de movimento		

Outra importante classificação para os desastres envolvendo movimentos gravitacionais de massa é Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade), apresentada na Quadro 10:

Quadro 10: Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade)

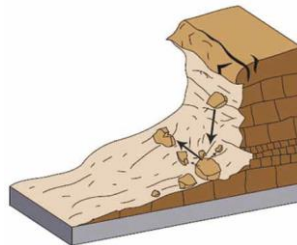
Tipo	Subtipo	Definição
Quedas, Tombamentos e Rolamentos	Blocos	As quedas de blocos são movimentos rápidos e acontecem quando materiais rochosos diversos e de volumes variáveis se destacam de encostas muito íngremes, num movimento tipo queda livre. Os tombamentos de blocos são movimentos de massa em que ocorre rotação de um bloco de solo ou rocha em torno de um ponto ou abaixo do centro de gravidade da massa despreendida. Rolamentos de blocos são movimentos de blocos rochosos ao longo de encostas, que ocorrem geralmente pela perda de apoio (descaçamento).
	Lascas	As quedas de lascas são movimentos rápidos e acontecem quando fatias delgadas formadas pelos fragmentos de rochas se destacam de encostas muito íngremes, num movimento tipo queda livre.
	Matacões	Os rolamentos de matacões são caracterizados por movimentos rápidos e acontecem quando materiais rochosos diversos e de volumes variáveis se destacam de encostas

		e movimentam-se num plano inclinado
	Lajes	As quedas de lajes são movimentos rápidos e acontecem quando fragmentos de rochas extensas de superfície mais ou menos plana e de pouca espessura se destacam de encostas muito íngremes, num movimento tipo queda livre.
Deslizamentos	Deslizamentos de solo e/ou rocha	São movimentos rápidos de solo ou rocha, apresentando superfície de ruptura bem definida, de duração relativamente curta, de massas de terreno geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora do talude. Frequentemente, os primeiros sinais desses movimentos são a presença de fissuras.
Corridas de massa	Solo/Lama	Ocorrem quando, por índices pluviométricos excepcionais, o solo/lama, misturado com a água, tem comportamento de líquido viscoso, de extenso raio de ação e alto poder destrutivo.
	Rocha/Detrito	Ocorrem quando, por índices pluviométricos excepcionais, rocha/detrito, misturado com a água, tem comportamento de líquido viscoso, de extenso raio de ação e alto poder destrutivo.
Subsidências e colapsos	-	Afundamento rápido ou gradual do terreno devido ao colapso de cavidades, redução da porosidade do solo ou deformação de material argiloso.

Highland e Bobrowsky (2008) definem os tipos de movimentos gravitacionais de massa, discutidos a seguir:

- A queda (Figura 9) se inicia com a separação do material em um talude íngreme sem que tenha influência de deslocamento por cisalhamento. O movimento é repentino e para baixo podendo bater nas paredes da encosta causando saltos. O material em queda pode quebrar e causar rolamentos até chegar em cotas mais baixas do terreno. Trata-se de um movimento muito rápido a extremamente rápido e é controlado por discontinuidades litológicas-estruturais, intemperismo físico, químico e chuvas extremas.

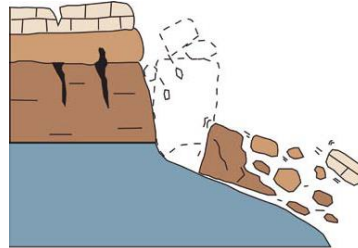
Figura 9: Ilustração de uma Queda



- O tombamento (Figura 10) é caracterizado por uma rotação frontal de uma massa de solo ou rocha para fora do talude em torno de um ponto ou eixo. Sua velocidade é extremamente lenta a extremamente rápida e seu movimento é controlado em maior parte pela ação da gravidade, entretanto, pode também ser pela ação da água presente

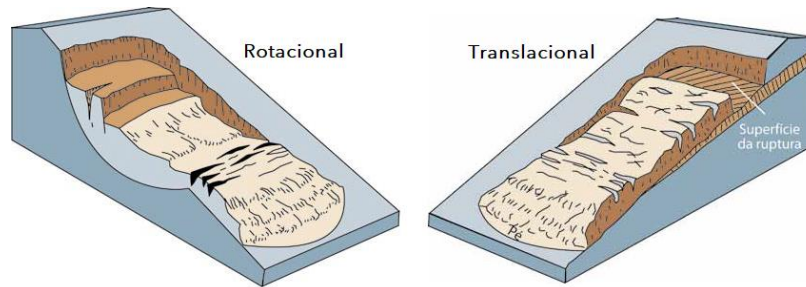
nas fissuras, vibração, erosão regressiva, condições climáticas, escavação ou erosão por cursos de água. Este tipo de movimento pode levar ao desencadeamento de quedas ou escorregamentos.

Figura 10: Ilustração de um Tombamento



- Os escorregamentos ou deslizamentos (Figura 11) podem ser definidos como um movimento de solo, rocha ou detrito em declive, ocorrendo sobre superfícies em ruptura ou em zonas relativamente finas com intensa deformação por cisalhamento. Alguns autores divergem em relação à causa principal da ocorrência dos escorregamentos, em alguns casos relacionados a força gravitacional (CHRISTOFOLETTI, 1980; GIANNINI; RICCOMINI, 2001), em outros à precipitação (IPT, 2007). A maioria dos autores, no entanto, sustenta que diversas variáveis devem ser levadas em consideração, tais como geomorfologia, geologia, solos, precipitação, entre outros (RIFFEL *et al.*, 2016). Segundo Riffel *et al.*, 2016 os deslizamentos são um dos eventos mais atuantes no Brasil, são processos marcantes na evolução das encostas, caracterizados por movimentos rápidos, com limites laterais e profundidade bem definidos. Em linhas gerais, podem ser divididos em dois tipos: Rotacionais, onde a superfície de ruptura é curvada no sentido superior, sendo a chuva intensa ou contínua o seu maior deflagrador. O segundo tipo são os deslizamentos translacionais onde o material move-se para fora ao longo de uma superfície relativamente plana. Este tipo de deslizamento pode progredir por longas distâncias se a superfície de ruptura estiver suficientemente inclinada. Como mecanismo deflagrador cita-se principalmente a chuva intensa e o encharcamento dos solos. Este é o tipo mais comum de deslizamento encontrado no globo.

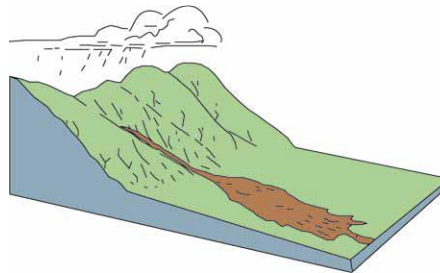
Figura 11: Ilustração de Escorregamentos



Fonte: Modificado de Highland e Bobrowsky (2008)

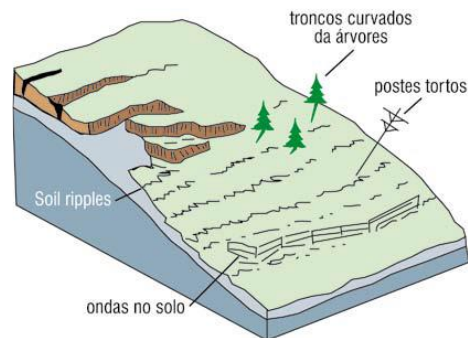
- As corridas (Figura 12) são as formas mais rápidas de movimentos gravitacionais de massa. Estes movimentos são controlados pela presença de água, a qual misturada ao solo, detritos ou rochas descem encosta abaixo em um movimento contínuo. Segundo Riffel *et al.* (2016) estão ligados a eventos pluviométricos extremos e mobilizam grandes volumes de material. São fenômenos menos frequentes que os escorregamentos, mas podem provocar consequências de magnitudes superiores devido ao seu grande poder destrutivo e extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas. Ocasionalmente, quando um escorregamento ganha velocidade, e a massa interna perde a coesão ou ganha água, esse fenômeno pode mudar para uma corrida. Os fluxos geralmente são desencadeados por um intenso fluxo de água na superfície do terreno que causa erosão e movimentam os materiais em regiões inclinadas.

Figura 12: Ilustração de uma Corrida



- Rastejo (Figura 13) é o nome informal dado aos fluxos lentos. Consiste em um movimento vagaroso, imperceptível e contínuo, para baixo do solo que forma o talude. O movimento é causado por tensões de cisalhamento internas suficientes para causar deformação, mas insuficientes para causar rupturas. O autor cita três tipos de rastejos: Os sazonais, contínuos, nos quais a tensão cisalhante contínua excede a resistência do material e as progressivas, onde os taludes atingem o ponto de ruptura gerando outros tipos de movimentação. Estes movimentos podem tomar proporções regionais ou apenas limitados a uma pequena porção do terreno.

Figura 13: Ilustração de um Rastejo



2.8.1 Incerteza na avaliação dos movimentos gravitacionais de massa

Mapeamentos de MGM's são extremamente importantes para o manejo e planejamento dos municípios. Estes mapeamentos tentam prever regiões instáveis perante as encostas, portanto, locais onde haveria risco para a potencial ou existente urbanização.

Segundo El-ramly (2001) as incertezas relacionadas aos modelos são devido a lacuna existente entre a teoria e os modelos utilizados em análises e as condições reais. Para o autor esta é uma das maiores fontes de incerteza na engenharia geotécnica.

Incertezas nas informações contidas em modelos de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa podem levar a custos sociais indesejados como infrações aos direitos de propriedade privada e investimentos econômicos desnecessários (KIM *et al.* 2018).

A incerteza dos modelos depende do nível de precisão com que o modelo matemático escolhido representa a realidade. Esta incerteza reflete a inabilidade de um modelo ou técnica de projeto em representar com precisão o verdadeiro comportamento físico do sistema, ou também, da inabilidade do projetista em identificar o melhor modelo (MONTROYA, 2013).

Para El-ramly (2001) a definição da estabilidade de taludes, particularmente de taludes naturais, é um problema dominado por incertezas. Anomalias geológicas, propriedades dos materiais, condições ambientais e os próprios modelos analíticos são fatores que contribuem para a incerteza. Os métodos convencionais não levam em consideração a incerteza e, portanto, comprometem as predições.

Fernandes *et al.* (2001) discutem modelos determinísticos, os quais se baseiam em modelos matemáticos para a descrição de alguns dos processos e leis físicas que controlam a estabilidade das encostas. De acordo com os autores as maiores limitações destes procedimentos determinísticos se dão devido ao conhecimento incompleto de muitos dos

processos envolvidos e à dificuldade de obtenção dos dados requeridos pelos modelos (especialmente em se tratando de grandes áreas).

De acordo com Costa (2005) as modelagens determinísticas levam em consideração dados disponíveis estimados, normalmente por julgamento, para encontrar a melhor estimativa simples para cada parâmetro de entrada no modelo e, então, essas estimativas são usadas nos modelos analíticos (ou numéricos) de previsão de desempenho. As análises fornecem resultados únicos, considerados como representações razoáveis da realidade. A suposição envolvida nesse tipo de abordagem é a de que o erro estimado (diferença entre o valor real desconhecido dos parâmetros de entrada e as estimativas) seja igual a zero. Nas Ciências da Terra, onde as propriedades dos materiais tendem a ser variáveis e os dados geralmente são esparsos, não há justificativa para essa suposição.

Oliveira (2004) levanta a questão: Como fazer para reconciliar o ponto de vista filosófico de que o mundo é determinístico com o pressuposto da Análise de Risco em que o mundo é aleatório? Para ele, a resposta que os analistas de risco encontraram é a de que o mundo deve ser modelado de forma matematicamente efetiva, como se algumas das suas incertezas não fossem apenas limitações do conhecimento, mas sim aleatórias.

Baseado no exposto pode-se concluir que há a necessidade de se analisar a ruptura de taludes levando-se em consideração a incerteza. Faz-se necessário desenvolver métodos que busquem explicar o fenômeno, mas que não desconsiderem o fato de não existir a possibilidade de incerteza em quaisquer das etapas de análise. Para tal, métodos probabilísticos, também chamados de estocásticos, vêm sendo estudados com o intuito de preencher esta lacuna (GAO *et al.* 2021).

2.9 INTRODUÇÃO SHALSTAB

O SHALSTAB, abreviação de “*Shallow Landslide Stability Model*” é um modelo matemático determinístico desenvolvido por Dietrich e Montgomery (1998) com o objetivo de prever áreas suscetíveis a escorregamento translacionais rasos. Este modelo é um resultado da combinação de dois modelos de estabilidade, o modelo de encosta infinita e um modelo hidrológico de estado uniforme. O primeiro utiliza parâmetros geotécnicos e topográficos, enquanto que o segundo utiliza parâmetros geomorfológicos e hidrológicos com o fim de estimar a saturação do terreno (MICHEL, 2013).

O SHALSTAB vem sendo muito estudado, especialmente após a sua automação em SIG por Dietrich e Montgomery (1998). Ramos *et al.* (2002) aplicaram o modelo na região do

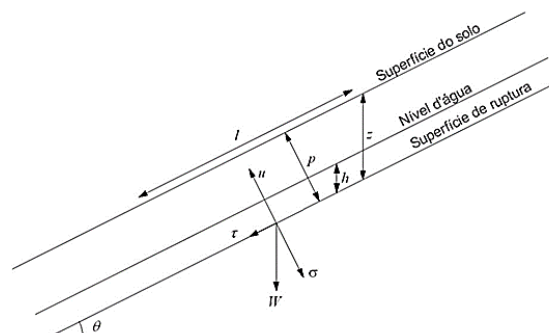
Quadrilátero Ferrífero, sem a consideração da coesão, onde concluíram a viabilidade e eficácia do mesmo. Melo (2018) analisou os efeitos das unidades geotécnicas no mapeamento SHALSTAB na bacia do arroio Jaguar, nos municípios de Alto Feliz e São Vendelino – RS. Reginatto (2013) caracterizou os movimentos gravitacionais de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha em Rio dos Cedros, Santa Catarina. Michel (2013) fez modificações no modelo para considerar os efeitos da vegetação ao analisar a estabilidade das encostas, também na bacia hidrográfica do Rio Cunha. O autor ainda traz um tutorial detalhado da aplicação do modelo no Arcgis. Zizioli *et al.* (2013) compararam o SHALSTAB a outros modelos determinísticos em Oltrepo Pavese, norte da Itália. Sbroglia (2015) mapeou as áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa na microbacia do Ribeirão Baú, em Ilhota, Santa Catarina. Em 2017, Sbroglia et al. (2017) desenvolveram uma ferramenta automatizada do modelo no Arcgis (ASA - *Automatic Shalstab Analysis*), tornando a sua aplicação ainda mais facilitada.

2.9.1 Modelo de Estabilidade de Encosta Infinita

A estabilidade de uma encosta pode ser expressa pela razão entre tensões estabilizadoras (σ) e tensões de desestabilização (τ). Esta razão é empregada no equacionamento do Fator de Segurança (FS), a qual diz que o FS pode ser determinado a partir da razão entre as forças resistentes e cisalhantes. Neste cenário, se as forças desestabilizadoras se igualarem às estabilizadoras tem-se um $FS = 1$, indicando a transição para a instabilidade. Se o FS for menor que 1, a encosta é considerada instável e se for maior que 1, estável.

A teoria de encostas infinitas (Figura 14) é empregada para escorregamentos translacionais rasos, onde a profundidade da superfície de ruptura é relativamente rasa comparada ao comprimento da encosta (MICHEL, 2013).

Figura 14: Modelo de encostas infinita.



Fonte: Michel (2013)

Segundo Sbroglia (2013) esta teoria considera uma extensão ilimitada de solo sobre uma superfície inclinada e o fluxo de água é paralelo à superfície.

O modelo se baseia na lei de Mohr-Coulomb e pode ser descrito pela Equação (6).

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \quad (6)$$

Onde τ é a tensão cisalhante no momento da ruptura; c é a coesão efetiva do solo; σ é a tensão normal; u é a poro-pressão; e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo. Desta forma, o lado direito da equação corresponde às forças resistentes e o lado esquerdo às forças desestabilizadoras.

O modelo SHALSTAB é expresso em função da porção da coluna de solo saturado, dessa forma o modelo de encostas infinito precisa sofrer algumas alterações. O peso da camada de solo (P), apresentado na Figura 14, pode ser definido em função da profundidade do solo (z), como visto pela Equação (7):

$$P = L \cdot \rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta \quad (7)$$

Onde P é o peso do solo (N); L é o comprimento (m); ρ_s é a densidade do solo (kg/m^3); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); z é a profundidade do solo (m); e θ é a declividade ($^\circ$).

As tensões τ e σ são paralelas e perpendiculares, respectivamente, à massa de solo e podem ser relacionadas ao peso do bloco para que possam ser expressas em força por unidade de área (Equações (8) e (9)).

$$\tau = \frac{P \cdot \sin \theta}{L} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{P \cdot \cos \theta}{L} \quad (9)$$

Substituindo a Equação (7) nas equações (8) e (9), gera-se:

$$\tau = \rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \quad (10)$$

$$\sigma = \rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \quad (11)$$

A poropressão (u), indicada na Figura 14 como nível d'água, é a pressão de água existente entre os poros da massa de solo e tem por objetivo reduzir a tensão normal do solo. Este fenômeno é expresso pela Equação (12):

$$u = \rho_a \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta \quad (12)$$

Onde ρ_a é a densidade da água (kg/m^3) e h é a altura da coluna de água no interior da camada de solo (m).

Portanto, substituindo-se as Equações (10, (11 e (12 na equação de Mohr Coulomb (5), relativo a teoria da encosta infinita, obtém-se a Equação (13):

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta = c + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta - \rho_a \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta) \cdot \tan \phi \quad (13)$$

Como dito o modelo SHALSTAB é expresso pela coluna saturada do solo, ou seja, em função do parâmetro $\frac{h}{z}$, apresentada na Equação (14).

$$\frac{h}{z} = \frac{c}{\rho_a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \quad (14)$$

Aplicando a Equação (14 em uma encosta faz-se possível duas situações extremas, a encosta ser incondicionalmente estável Equação (15) ou incondicionalmente instável Equação (16). Quando a relação $\frac{h}{z}$ iguala-se a 1 considera-se a encosta incondicionalmente estável, ou seja, o relevo não é acidentado o suficiente para causar uma ruptura, mesmo que se encontre totalmente saturado. Em contrapartida, quando a razão $\frac{h}{z}$ se iguala a 0 (zero) desenvolve-se a condição incondicionalmente instável, a encosta possui uma declividade tão elevada que propicia a ruptura, mesmo que não haja saturação do solo. Em outras palavras, as relações dos parâmetros de resistência ao cisalhamento não são suficientes para compensar os efeitos da declividade.

$$\tan \theta \leq \tan \phi \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z} \quad (15)$$

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z} \quad (16)$$

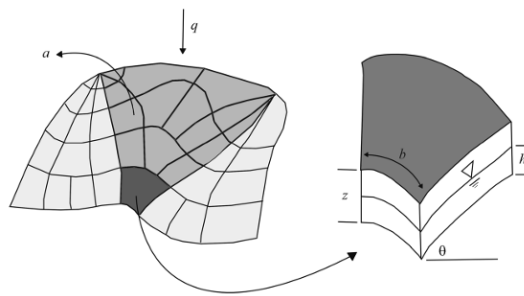
2.9.2 Modelo Hidrológico de Estado Uniforme

Beven e Kirkby (1979) demonstraram que a saturação de um solo em função da topografia está relacionada com a área de drenagem que capta a água (a), conduzida ao local de escoamento à jusante passando por uma unidade de contorno (b) e pela declividade da encosta (θ). Estes princípios geram o denominado TOPMODEL, do qual o modelo hidrológico se baseia.

A partir destes princípios, O'Loughlin (1986) desenvolveu um modelo que assume um estado uniforme de recarga, denominado TOPOG. O modelo simula a variação da

umidade (altura da coluna d'água), que é definida como a parcela saturada do solo, a qual ocorre durante uma época chuvosa. O nível de saturação do solo, portanto, é definido a partir da relação entre a água que entra no sistema (recarga uniforme) e a água que sai pela camada saturada de solo. Em outras palavras, considera-se que o fluxo se infiltra até um plano de mais baixa condutividade hidráulica, em geral o contato solo-rocha, onde seguirá um caminho determinado pela topografia (GUIMARÃES *et al.*, 2013). A Figura 15 demonstra o conceito do modelo TOPOG onde a é a área de contribuição a montante (m^2); b é o comprimento de contorno da fronteira inferior de cada elemento (m); e q é a taxa de recarga uniforme (m/d).

Figura 15: O modelo de estado uniforme TOPOG.



Fonte: Modificado de Montgomery e Dietrich (1994).

A quantidade de água total que entra no sistema Q_e (m^3/dia) pela área de contribuição pode ser expressa pela Equação (17):

$$Q_e = q \cdot a \quad (17)$$

O modelo hidrológico de O'Loughlin (1986) diferencia-se do de Beven e Kirkby (1979) pois considera o valor da condutividade hidráulica saturada (K_s) constante para toda a camada de solo acima da rocha impermeável, enquanto que o TOPMODEL considera que este K_s diminui com o aumento da profundidade do solo. Sendo assim, considerando o K_s constante, a quantidade total de água que sai (Q_s) pela camada saturada (escoamento superficial) pode ser expressa pelo produto da velocidade de fluxo pela seção transversal da área de saída (Equação 18). O gradiente hidráulico é o quociente entre a carga hidráulica e o meio poroso percorrido, já a carga hidráulica é a diferença de altitude entre o ponto inicial e final do escoamento e o comprimento do meio poroso é o comprimento da encosta. Sendo assim, pode-se definir o gradiente hidráulico pelo $\text{sen } \theta$:

$$Q_s = K_s \cdot i \cdot h \cdot \cos \theta \cdot b = K_s \cdot \text{sen } \theta \cdot h \cdot \cos \theta \cdot b \quad (18)$$

Onde K_s é a condutividade hidráulica saturada (m/d); Q_s é o escoamento superficial (m^3/d); e i é o gradiente hidráulico (m/m).

Ao ocorrer a condição uniforme a quantidade de água que entra no sistema é a mesma que sai ($Q_e = Q_s$), desta forma, podemos expressar esta relação pela Equação 19:

$$q \cdot a = K_s \cdot \text{sen } \theta \cdot h \cdot \cos \theta \cdot b \quad (19)$$

Ao se considerar o solo inteiramente saturado, a quantidade de água que sai pela camada de solo é máxima, sendo assim, a Equação (18 modifica-se para a Equação 20. A transmissividade do solo é o parâmetro que define como o solo distribui a água pelo sistema, sendo função do produto entre o K_s e z , expresso pela Equação 21:

$$Q_{Smax} = K_s \cdot \text{sen } \theta \cdot z \cdot \cos \theta \cdot b = b \cdot T \cdot \text{sen } \theta \quad (20)$$

$$T = K_s \cdot z \cdot \cos \theta \quad (21)$$

Onde T é a transmissividade do solo (m^2/d).

A umidade (*wetness*) foi definida por O'Loughlin (1986) como a parcela saturada do solo em um dado estado uniforme de recarga, portanto, o nível de saturação do solo é obtido através da relação entre a água que entra no sistema sob forma de recarga uniforme e a água que sai através da camada saturada do solo. Em outras palavras, nos locais onde o fluxo de água recebido supera a capacidade do solo em transmiti-lo, ocorre sua saturação (SBROGLIA, 2015). A umidade é expressa pela relação entre Q_e e Q_{Smax} , apresentada na Equação 22:

$$W = \frac{Q_e}{Q_{Smax}} = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \text{sen } \theta} \quad (22)$$

Onde W é a umidade (*wetness*) (m/m).

Substituindo as Equações (19 e (20 na 22 obtém-se:

$$W = \frac{K_s \cdot \text{sen } \theta \cdot h \cdot \cos \theta \cdot b}{K_s \cdot \text{sen } \theta \cdot z \cdot \cos \theta \cdot b} = \frac{h}{z} \quad (23)$$

Portanto, a partir da Equação 23 pode-se aplicar o modelo hidrológico em função de h/z , representando a proporção saturada da espessura do solo.

$$W = \frac{h}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \text{sen } \theta} \quad (24)$$

2.9.1 Integração dos Modelos Hidrológico e Encosta Infinita: SHALSTAB

A combinação do modelo hidrológico com o de estabilidade de encostas infinita pode ser feita a partir da razão h/z , igualando-se as Equações (14 e 24, gerando a Equação 25:

$$\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} = \frac{c}{\rho_a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \quad (25)$$

O SHALSTAB soluciona a Equação 25 em função dos parâmetros hidrológicos livres q e T , conforme a Equação 26. Ainda, Montgomery e Dietrich (1994) recomendam que o cálculo de q/T seja feito em uma escala logarítmica, com a finalidade de traduzir os valores resultantes em níveis de suscetibilidade, como apresentado na Equação 27:

$$\frac{q}{T} = \frac{\sin \theta}{a/b} \cdot \left[\frac{c}{\rho_a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \right] \quad (26)$$

$$\log \frac{q}{T} = \frac{\sin \theta}{a/b} \cdot \left[\frac{c}{\rho_a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) \right] \quad (27)$$

Segundo Guimarães *et al.* (2003) a definição em classes foi realizada seguindo os seguintes critérios: Juntaram-se em uma mesma classe todos os pixels com valores que são considerados incondicionalmente estáveis e o mesmo foi feito para os considerados incondicionalmente instáveis. Os valores intermédios correspondem, portanto, a uma faixa de transição entre as duas classes anteriores, valores próximos aos considerados incondicionalmente instáveis necessitam pouca quantidade de chuva para romper, enquanto que aqueles considerados incondicionalmente estáveis necessitam de uma grande descarga hidráulica para ocorrer um deslizamento.

De acordo com Michel (2013), Dietrich e Montgomery (1998) e Dietrich *et al.* (2001) aplicaram, calibraram e validaram o modelo SHALSTAB em diversas bacias na Califórnia. Os resultados mostraram que adotando como limiar de instabilidade o valor de $\log \frac{q}{T}$ de -3,1, o modelo foi capaz de detectar 56% do volume total de escorregamentos ocorridos nestas bacias, enquanto que a área classificada como instável representou apenas 8% da área total. Quando aumentado o valor do limiar de estabilidade para $\log \frac{q}{T}$ igual a -2,8, o volume de escorregamentos detectados aumentou para 72%, todavia a área considerada instável na bacia passou para 13%. Adotando como critério a maior relação entre a

porcentagem de escorregamentos detectados e porcentagem de área instável, o valor de $\log \frac{q}{T}$ igual a -3,1 foi estabelecido como limiar de estabilidade.

De acordo com Dietrich e Montgomery (1998) a classificação do modelo SHALSTAB é apresentada na Tabela 5. Os valores de $\log \frac{q}{T}$ são traduzidos em quantidades de chuva (q) necessários para causar a instabilidade. Para uma transmissividade de 65m²/dia os valores de q são apresentados na tabela.

Tabela 5: Classificação do modelo SHALSTAB

Índices de estabilidade	q (mm/dia)	Classes de estabilidade
Incondicionalmente estável	-	Incondicionalmente estável e saturado
> -2,2	> 400	Incondicionalmente estável e não saturado
-2,2 a -2,5	400 – 200	Estável e não saturado
-2,5 a -2,8	200 - 100	Instável e não saturado
-2,8 a -3,1	100 - 50	Instável e saturado
< -3,1	< 50	Incondicionalmente instável e não saturado
Incondicionalmente instável	-	Incondicionalmente instável e saturado

Fonte: Dietrich e Montgomery (1998)

2.10 SHALSTAB E A RELAÇÃO COM A INCERTEZA

O modelo SHALSTAB, assim como outros modelos determinísticos, são repletos de incertezas e possíveis fontes de erros. O MDT, fonte dos parâmetros topográficos de entrada e da área de contribuição, a depender da escala e resolução espacial resultará em diferentes cenários SHALSTAB. Zhang e Montgomery (1994) compararam diferentes resoluções espaciais na representação da paisagem bem como na determinação de áreas de contribuição, concluindo que a resolução espacial afeta significativamente ambos. Para os autores, além da questão resolução, os dados originais com os quais se constrói o MDT também necessitam de altas precisões, afinal, o MDT é uma representação do que se vê em campo.

Reginato *et al.* (2021) analisaram a dependência do modelo SHALSTAB em relação a dois MDT's, um em escala 1:10.000 (resolução espacial de 1m) e outro em 1:50.000 (resolução espacial de 10m). Com relação a declividade notou-se um aumento máximo de 8% nas declividades entre 10° e 20°, enquanto que as declividades mais elevadas, entre 30° e 50°, sofreram um decréscimo máximo de 8%. Os autores concluíram que na escala 1:50.000, devido a declividade, houve uma superestimação das áreas estáveis (por volta de 27%). Em

comparação, a escala maior obteve uma melhor distribuição das classes de estabilidade e apresentou uma melhor sensibilidade.

A profundidade do solo é uma informação primordial para o modelo SHALSTAB, ela controla o parâmetro transmissividade em conjunto com a condutividade hidráulica e faz parte diretamente na formulação do modelo. Entretanto, é muito difícil de definir precisamente, mesmo em áreas pequenas. A profundidade do solo, como demonstrado por Dietrich *et al.* (1995) é controlada pelo balanço entre o transporte e produção de sedimentos, sendo a sua determinação bastante difícil. Muitos estudos acabam por estimar que a profundidade é homogênea para a área de estudo, o que pode subestimar ou superestimar o modelo. Dessa forma, os autores que seguem tal metodologia criam diversos cenários para diferentes profundidades de solo.

Outra forma é a de execução de tradagens e interpolação dos valores especializados, todavia, a quantidade de tradagens nunca será suficiente para explicar toda a localidade. E, por fim, há aqueles que se baseiam em leis matemáticas controladas por variáveis topográficas para determinar a profundidade do solo, muitas dessas equações são discutidas por Michel (2015). Seja qual for a opção adotada, todas são incertas e devem ser tratadas como possíveis fontes de incerteza.

A determinação do parâmetro transmissividade se dá através do produto entre a profundidade do solo e a condutividade hidráulica saturada. Os ensaios de laboratório para a determinação do parâmetro condutividade hidráulica saturada pode apresentar problemas de interpretação decorrentes da heterogeneidade das amostras, do efeito de amolgamento resultante do processo de amostragem em campo e do fator escala, já que o ensaio será conduzido em uma pequena amostra do todo. Já as determinações feitas em campo reduzem os problemas com amolgamento e reduzem efeitos de escala, entretanto, a interpretação dos resultados geralmente se dá a partir de modelos empíricos ou semi-empíricos, dadas as complexas condições de contorno que se estabelecem durante a infiltração d'água no solo (PINHEIRO *et al.*, 2017). Ainda segundo o autor, esta é uma das propriedades dos solos de mais alta variabilidade.

Os parâmetros geotécnicos, balizadores das condições de estabilidade e instabilidade no modelo são outra forma de incerteza. Originalmente o modelo SHALSTAB requeria valores constantes e homogêneos para a área de estudo, entretanto, sabe-se que os valores de coesão, ângulo de atrito interno e peso específico são variáveis nas encostas. Nunca será possível definir tantos pontos quanto necessários para explicar toda a variabilidade destes

dados na natureza. Michel *et al.* (2013), Sbroglia *et al.* (2018) e Melo *et al.* (2021), pensando nesta variabilidade, utilizaram valores centrais para os parâmetros e os variaram, para mais e para menos, em determinadas porcentagens.

Comenta-se duas formas para espacializar os dados geotécnicos, ou utilizando os pontos amostrais, através dos polígonos de Voronoi ou utilizando metodologias de mapeamento geotécnico. Seja qual for o método empregado há generalização, define-se para uma dada área um valor médio dos parâmetros.

Por fim, o inventário de cicatrizes, utilizado para validar os modelos, se não construído com o devido cuidado e precisão, pode levar o analista a conclusões tendenciosas.

Michel *et al.* (2021) cita que algumas limitações do SHALSTAB devem ser consideradas, como a componente geomecânica, da qual apenas são consideradas as tensões basais da camada de solo e os parâmetros do solo são considerados constantes ao longo da profundidade. Quanto ao modelo hidrológico, os autores citam a admissão por parte do modelo de uma altura da camada d'água no solo resultante de condições de estado permanente e uniforme de recarga, o que raramente ocorre em eventos intensos.

A incerteza do modelo determinístico SHALSTAB é uma combinação das incertezas associadas aos parâmetros de entrada. Ainda que seja possível simular variabilidade nos dados, criando cenários para o problema, isso se torna um processo tedioso, trabalhoso e demorado, onde até mesmo a definição dos cenários pode gerar ainda mais incertezas.

2.11 MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

Em geral esse tipo de metodologia é utilizado em conjunto com modelos determinísticos apoiados no fator de segurança (FS), os conceitos aqui discutidos farão referência ao FS mas podem ser modelados para o caso do SHALSTAB.

As análises probabilísticas de estabilidade de taludes se baseiam nos mesmos princípios dos métodos determinísticos – modos de falha, equilíbrio limite, entre outros. Entretanto possuem a vantagem de serem capazes de levar em consideração, quantitativamente, várias fontes de incerteza. O *output* de uma análise probabilística contém mais informação sobre a performance da encosta do que o FS isoladamente. Além de fornecer a condição mais provável, também indicará a potencial variabilidade devido à incerteza (EL-RAMLY, 2001). O mesmo é válido para o SHALSTAB onde isoladamente o modelo expressa limiares de estabilidade que são sujeitos a dúvidas e incertezas mas, ao se valer das técnicas

probabilísticas, descritas a seguir, podemos reduzi-las e aumentar a confiabilidade dos resultados.

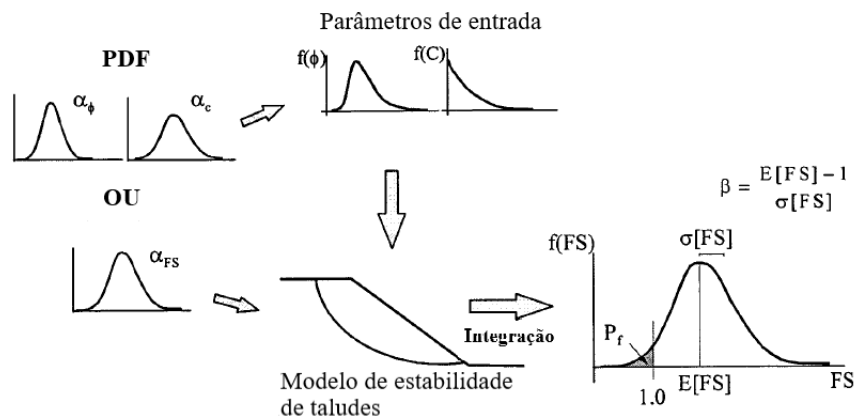
Para Baecher e Christian (2003) um dos mais importantes fundamentos da teoria da probabilidade é a probabilidade condicional com os seus efeitos: dependência e independência. Informalmente o autor explica a probabilidade condicional da seguinte forma: Um evento A pode mudar se um evento B acontecer. Portanto, a probabilidade condicional do evento A dado o evento B é definido como $P(A|B)$; A probabilidade do evento A independente de B denota-se $P(A)$, conhecido como a probabilidade marginal. Para o caso da probabilidade marginal igualar-se a probabilidade condicional obtém-se a Equação 28, onde A é independente de B:

$$P(A|B) = P(A) \quad (28)$$

Existem diversas formas de relacionar os eventos, isto é conhecido na teoria da probabilidade como axiomas. Desta forma, ainda segundo os autores supracitados, diversas relações matemáticas derivam diretamente destes axiomas de probabilidade e algumas destas relações são apresentadas na tese de Oliveira (2004).

Geralmente ao se tratar da estabilidade de taludes a probabilidade de ruptura é definida através do FS, sendo a ruptura relacionada a um valor menor do que 1. Portanto, o que se quer definir é a probabilidade que a encosta assuma $FS < 1$. Para o caso do SHALSTAB esse limiar de instabilidade pode ser representado por $\log \frac{q}{T} < -3,1$, ou através de análise da área de estudo em relação às cicatrizes para definição do limiar ótimo. Figura 16 apresenta o conceito de uma análise probabilística.

Figura 16: Conceito de uma análise probabilística. PDF é o modelo de distribuição aleatório dos dados de entrada; P_f é a probabilidade de falha.



Fonte: Lacasse e Nadim (1996, apud EL-RAMLY, 2001, p. 74).

A probabilidade é uma medida de certeza e tem o seu valor variando entre 0 – impossibilidade – e 1 – certeza. São duas as principais interpretações, a frequência estatística e a probabilidade subjetiva. O primeiro é o resultado de repetitivos experimentos, como jogar uma moeda n vezes. Este tipo de probabilidade é conhecido como a probabilidade relativa frequentista por que existe no mundo real e é medida através de experimentos. Já a segunda, subjetiva, é quantificada através do julgamento, da crença ou da confiança pelas informações disponíveis. Trata-se de uma probabilidade afetada pelo estado de entendimento do fenômeno e pode sofrer mudanças com o passar do tempo ou conforme o conhecimento mude (COROMINAS; MAVROULI, 2011).

Corominas *et al.* (2014) separam os métodos probabilísticos em (a) Heurísticos (abordagem por julgamento); (b) Métodos racionais (abordagem geomecânica); (c) Probabilidade empírica; (d) abordagens indiretas.

- a) Os métodos heurísticos são baseados nas opiniões de especialistas, sendo estas opiniões passíveis de serem quantificadas através de atribuição de probabilidades. De acordo com Corominas *et al.* (2014) uma maneira de sistematizar esse tipo de abordagem é executar as avaliações por meio de árvores de decisão, as quais representam todas as possibilidades que podem ocorrer no sistema;
- b) Nesse tipo de abordagem a probabilidade é estimada a partir de análises de estabilidade e modelos numéricos. Uma das vantagens desta abordagem é a possibilidade de implementação dos *outputs* em SIG para que se possa demonstrar áreas potenciais de ocorrência em forma de mapa. Ainda de acordo com o autor, os métodos geomecânicos consideram a ruptura das encostas sendo dependentes do espaço, tempo e stress no interior das massas de solo. É a partir dessas variáveis dependentes que permite-se definir o FS e, por consequente, a probabilidade de ruptura. Essa probabilidade é resultado do valor de FS ser menor do que 1. São nos métodos racionais que os métodos Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM), Estimativas Pontuais e Monte Carlo, por exemplo, se baseiam.
- c) Também conhecida como a probabilidade estatística, pode ser determinada a partir da frequência de eventos pretéritos caracterizados por um inventário de cicatrizes. Segundo Corominas *et al.* (2014) os MGM são tratados como eventos recorrentes e ocorrem randomicamente e independentemente. Essa maneira de tratar a probabilidade dos MGM não é completamente correta pois os eventos não são independentes e as condições externas não são estáticas.
- d) Corominas *et al.* (2014) definem este tipo de método a partir de relações entre variáveis potencialmente causadoras e os MGM. Pode-se definir um limiar crítico de chuva ou terremoto, por exemplo, a partir do qual a probabilidade de ocorrência de um MGM se torna provável sendo isto feito a partir de comparações destes eventos com os MGM.

Para El-ramly (2001) os métodos variam em termos de hipóteses, limitações, capacidade de lidar com problemas complexos e complexidade matemática. Para o autor, entretanto, a maioria desses métodos pertencem a três categorias, os métodos analíticos, os aproximados e o Monte Carlo, que será tratado em um tópico específico adiante.

Nos métodos analíticos são derivadas expressões matemáticas para a função densidade de probabilidade do FS. Todavia, a complexidade envolvida torna esse método praticamente impraticável para a maioria dos casos.

Já os métodos aproximados, em sua maioria, são modificações dos métodos Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM) e das Estimativas Pontuais. Ambos os métodos requerem que se conheça a média e a variância de todos os dados de entrada, assim como as funções de performance que definem o FS.

Técnicas probabilísticas muito podem ajudar no entendimento da maior parte das fontes de risco, podem melhorar as decisões de engenharia e permitir comparações racionais da confiabilidade em designs alternativos. Finalmente, esse tipo de análise terá o benefício de melhorar o processo de decisão, sendo um valioso suplemento às práticas convencionais (EL-RAMLY, 2001).

2.11.1 Variáveis Aleatórias

A utilização de praticamente qualquer método probabilístico requer variáveis aleatórias. Nas análises de estabilidade de taludes alguns parâmetros frequentemente utilizados são incertos, como a coesão dos solos, o ângulo de atrito, a profundidade do solo ou o peso específico. Segundo Pereira (2011), as variáveis geralmente são adquiridas através de múltiplas medições ou leituras e estas múltiplas variáveis combinadas geram múltiplos resultados. A obtenção de múltiplos resultados sem nenhum padrão ou proporcionalidade é descrito como incerteza, variabilidade ou estocasticidade.

Uma variável aleatória é um modelo matemático que representa uma quantidade que varia. Especificamente, um modelo de variável aleatória descreve os possíveis valores que a quantidade pode assumir e as respectivas probabilidades de diferentes valores ocorrerem (FENTON *et al.*, 1997).

De acordo com Pereira (2011), para fenômenos físicos como os intrinsecamente ligados à engenharia civil, as variáveis são, em geral, contínuas pois expressam grandezas físicas que podem assumir qualquer valor dentro de um intervalo.

Existem diferentes formas de se modelar a variabilidade das variáveis, geralmente associadas a funções densidade de probabilidade (PDF), para o caso de uma variável contínua. Matematicamente, denota-se $f_x(x)$. É com base nestas funções que se pode calcular a probabilidade de uma variável assumir determinado valor dentro de um intervalo estipulado.

De acordo com Fenton *et al.* (1997) variáveis contínuas aleatórias podem assumir qualquer valor dentro de um espaço amostral. Para as PDF's há um número infinito de possibilidades que o valor poderá assumir, portanto, o que se define é um pequeno intervalo, dentro do qual há a possibilidade de se obter determinado valor para a variável. Em outras palavras, as PDF's descrevem a probabilidade que determinada variável terá um determinado valor dentro da distribuição.

Modelos comumente utilizados na engenharia são apresentados na Tabela 6, onde as funções normais e log normal são as mais recorrentes.

Tabela 6: Funções probabilidade de densidade comumente utilizadas.

Distribuição	PDF	Média	Variância	Explicações
Uniforme	$f_x(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$	-
Exponencial	$f_x(x) = v \cdot e^{-vx}, \quad x \geq 0$	$\frac{1}{v}$	$\frac{1}{v^2}$	X representa o tempo entre ocorrências independentes, onde v é a taxa de ocorrência
Normal	$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$ $-\infty < x < \infty$	μ	σ^2	X representa a soma de várias variáveis randômicas
Log Normal	$f_x(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln x}\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2}$ $x \geq 0$	$e^{\mu_{\ln x} + \frac{1}{2}\sigma_{\ln x}^2}$	$\mu_{\ln x}^2 (e^{\sigma_{\ln x}^2 - 1})$	X representa o produto de várias variáveis aleatórias

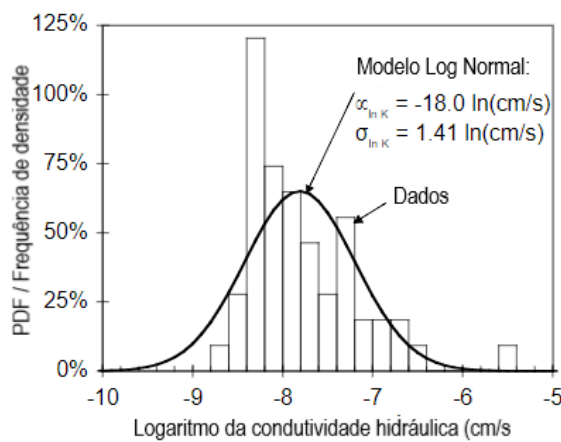
Fonte: Fenton *et al.* (1997)

Cada função densidade de probabilidade é utilizada em casos específicos, a uniforme é bastante empregada em testes de *bias*, a normal para a profundidade do solo ou os parâmetros de resistência dos solos, ainda que alguns autores não o façam, pois trata-se de uma função que permite valores negativos. Para tanto, a função log normal é mais utilizada para descrever os parâmetros de resistência, além da condutividade hidráulica saturada. A função exponencial é muito utilizada para modelar o tempo de retorno de terremotos, por exemplo.

De acordo com Fenton *et al.* (1997), a distribuição normal, também conhecida como distribuição Gaussiana é simétrica e suas caudas decaem exponencialmente. Sendo assim, há 68% de chance que uma variável esteja entre + ou - 1 desvio padrão do valor médio; 95% entre + ou - 2 desvios padrão da média; e 99,7% entre + ou - 3 desvios padrão do valor médio.

Já a função Log normal, ainda de acordo com o autor supracitado, é conveniente principalmente por duas propriedades muito importantes na engenharia, a primeira é que os seus valores nunca serão negativos, algo válido para a situação de modelagem dos dados de resistência ao cisalhamento ou condutividade hidráulica dos solos, por exemplo. A segunda é que se adequa muito bem para variáveis que possuem grandes ordens de magnitude, como por exemplo a condutividade hidráulica. A Figura 17 apresenta um PDF log normal aplicado a um conjunto de dados hipotéticos de condutividade hidráulica.

Figura 17: Distribuição densidade de probabilidade para um conjunto hipotético de dados de condutividade hidráulica saturada.



Fonte: Adaptado de Fenton *et al.* (1997)

A função PDF Gama vem sendo utilizada para modelar fenômenos ligados à área e magnitude de movimentos gravitacionais de massa, especialmente quando tratada de forma inversa (TEBBENS, 2020; MALAMUD *et al.*, 2004).

A função gama é contínua e exponencial, utilizada para modelar valores positivos assimétricos para a direita. Sua distribuição pode ser definida por três parâmetros, forma, escala e limiares e é apresentada na Equação (29).

$$p(x|\alpha, \beta) = \frac{e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \quad (29)$$

Onde α é o parâmetro de forma; β é o parâmetro de escala; e Γ é a função gama, a qual é uma extensão analítica da função fatorial ($\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$).

Os parâmetros α e β tornam esta distribuição amplamente versátil, fazendo possível a possibilidade de obtenção de uma grande variabilidade de formas.

Outra constatação importante ao se tratar de variáveis aleatórias é a possibilidade de obtenção de funções cumulativas de densidade (CDF). De acordo com Fenton *et al.* (1997), as

CDF's descrevem a probabilidade que dada variável randômica assuma um valor menor ou igual a um determinado valor. Essas funções são calculadas a partir da área abaixo da PDF, mas, como existem infinitos números de possibilidades que o valor pode assumir dentro da amostra, o processo de soma dos valores é uma integração.

2.11.2 Método Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um método de iteração/simulação bastante eficiente em se tratando de resolução de problemas matemáticos complexos, resolvendo-os de forma mais eficiente. Para Baecher e Christian (2003) problemas envolvendo processos aleatórios, onde os dados de entrada são estocásticos e os resultados incertos, verifica-se que as simulações de Monte Carlo se tornam particularmente eficientes.

Simulação Monte Carlo é o termo aplicado a simulações estocásticas, quer discretas, em tempo real, ou alguma combinação delas, que incorporam variabilidade aleatória no modelo (BONATE, 2001). É uma técnica utilizada para desenhar cenários de um evento aleatório e atribuir probabilidades a estes cenários para ajudar nas tarefas de tomada de decisão. É um dos métodos numéricos mais versáteis e amplamente utilizados (CAFLISCH, 1998).

A técnica simula repetidamente o modelo, desenhando cada vez um conjunto aleatório de valores (inputs) diferente da distribuição de amostras dos parâmetros do modelo, cujo resultado é um conjunto de resultados possíveis (outputs) (BONATE, 2001).

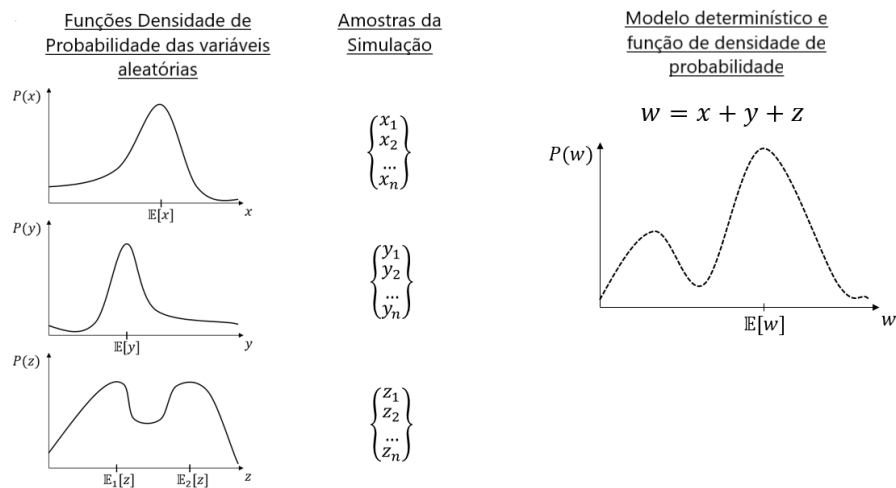
De acordo com Costa (2005) a abordagem do método de Monte Carlo pode ser delineada em algumas etapas, são elas:

- Seleção do modelo determinístico base para a determinação da função desempenho, por exemplo Bishop, SINMAP, SHALSTAB;
- Tomada de decisão sobre quais parâmetros serão modelados probabilisticamente e a definição das distribuições de probabilidade que serão utilizadas nas variáveis de entrada;
- Estimativa dos parâmetros de entrada no modelo determinístico adotado. Para tal, usa-se um falso gerador de números aleatórios que seleciona um número aleatório para cada variável de entrada baseado na sua distribuição de probabilidades. E, após isto, usam-se esses valores para resolver a função de desempenho.
- O processo é repetido diversas vezes com o intuito de se construir a distribuição de frequências da variável de desempenho (Fator de Segurança ou, neste caso, um valor $\log \frac{q}{T}$), de onde se obtém suas principais características de variação, o valor médio e a probabilidade de ruptura da encosta (para o FS, $FS < 1$; Para SHALSTAB, $\log \frac{q}{T} < 3,1$, por exemplo).

A lógica por trás do método é que se pode estimar o valor esperado E de uma variável aleatória $X(s)$, onde s é uma amostra do espaço de distribuição $P(X)$, avaliando o resultado mais frequente ao amostrar os resultados do evento muitas vezes (Clare, 2022).

Portanto, ao utilizar diferentes conjuntos de entradas no modelo simulado, faz-se possível coletar informação que possibilite desenhar a função densidade de probabilidade (PDF) do modelo. A Figura 18 apresenta tal processo.

Figura 18: Ilustração conceitual do método Monte Carlo.



A definição clássica de probabilidade exige que os resultados tenham todas a mesma chance. Se os resultados não têm todos a mesma chance, devemos apelar para a estimativa pela frequência relativa. Ao calcular probabilidades pelo método da frequência relativa, obtemos uma aproximação em lugar de um valor exato. À medida que o número de observações aumenta, as probabilidades tendem a ficar mais próximas da probabilidade efetiva. Esta propriedade é enunciada como a **Lei dos Grandes Números** (OLIVEIRA, 2004).

Em se tratando de mapas em formato *raster*, o processo de simulação de Monte Carlo trabalha de pixel em pixel (ou elemento da matriz), demandando grande poder computacional. Após diversas iterações (n), contam-se quantas vezes o cenário de ruptura foi atingido (m). Valendo-se da lei dos grandes números a tendência é que chegar-se-á próximo da probabilidade efetiva (p_f) para cada elemento da matriz. A Equação 30 define tal processo.

$$p_f = \frac{m}{n} \quad (30)$$

El-ramly (2001) pontua diversas vantagens do método, primeiramente, não requer que o analista tenha compreensão estatística e matemática de outros métodos. Em segunda

instância, o mesmo provê o formato da distribuição de probabilidades do fator de segurança e, conseqüentemente, a probabilidade de falha, eliminando a necessidade de se assumir uma forma para esta distribuição. Em terceiro lugar, diferentemente de outras abordagens, não há aumento da complexidade da análise ao se aumentar o número de parâmetros de entrada.

Vários autores aplicaram o método de Monte carlo em suas pesquisas, alguns a serem citados são El-ramly (2001), Costa (2005), Strauch *et al.* (2017) e Gao *et al.* (2021).

2.12 VALIDAÇÃO

A validação dos modelos de predição é uma etapa essencial e de enorme importância. Sem esta etapa, não há como afirmar a consistência ou a acurácia dos resultados. Além da consistência e da acurácia, Chung e Fabbri (2003) acrescentam que a validação serve também para comunicar a não especialistas o significado das previsões, para que possam ser tomadas decisões sobre usos mais seguros do solo como consequência dos resultados das previsões. No processo de validação são utilizados conjuntos de dados referentes às cicatrizes, ou seja, MGM's já ocorridos na área de estudo, para que se possa acessar a confiabilidade do modelo preditivo.

A acurácia do modelo preditivo é avaliada pela análise entre a concordância do modelo com os dados observados (MGM). Estes dados observados indicam a presença ou ausência do fenômeno em uma dada unidade de terreno, portanto, uma maneira fácil de comparar os dados observados com o modelo é a partir de classificações binárias em unidades de terreno estáveis ou instáveis. Esta classificação requer a definição de um limiar de instabilidade (*cutoff*) e pode então ser avaliada através de tabelas de contingência, ou matrizes de confusão (COROMINAS; MAVROULI, 2022), apresentada no Quadro 11.

Quadro 11: Matriz de confusão para avaliação de modelos.

		Modelo Preditivo		
		Verdadeiro	Falso	
Dados observados	Positivos	Verdadeiro positivo (VP)	Falso positivo (FP)	→ Valor previsto positivo
	Negativos	Falso negativo (FN)	Verdadeiro negativo (VN)	→ Valor previsto negativo
		↓ Sensitividade	↓ Especificidade	Acurácia

Fonte: Corominas e Mavrouli (2022)

É importante notar que o objeto a ser validado é a área onde o MGM se inicia, ou, onde ocorre a ruptura da encosta. Um MGM é essencialmente dividido em três partes, a zona de ruptura, de transporte do material e de acumulação. Cada fase possui um controle geomorfológico diferente (CHUNG; FABBRI, 2003) e, portanto, considerar as cicatrizes

deste conjunto de dados como um todo na validação pode levar a conclusões errôneas. A Figura 19 demonstra um conjunto de dados onde as cicatrizes foram divididas em zonas de ruptura e deposição.

Figura 19: Exemplo de separação das cicatrizes em zonas de ruptura (hachurado em preto) e acumulação.



Fonte: Chung e Fabbri (2003)

De acordo com Chung *et al.* (1995, apud REMONDO *et al.*, 2003, p. 5) normalmente é assumido que futuros MGM ocorrerão nos mesmos locais onde já ocorreram na área de estudo. Se os mapas preditivos obtidos forem coincidentes com as cicatrizes, são considerados satisfatórios. No entanto, esta não é uma validação de valor preditivo, mas de “taxa de sucesso”.

A seguir, três modelos de validação que serão aplicados neste trabalho serão expostos.

2.12.1 Receiver Operating Characteristic e Area Under the Curve (ROC/AUC)

O ROC foi desenvolvido na segunda guerra mundial com o objetivo de acessar a performance de radares receptores na detecção de alvos. O classificador é aplicado nos mais diversos usos, nas mais diferentes áreas das ciências, seja no diagnóstico médico ou em *machine learning* (FRATTINI *et al.*, 2010; FAWCETT, 2006).

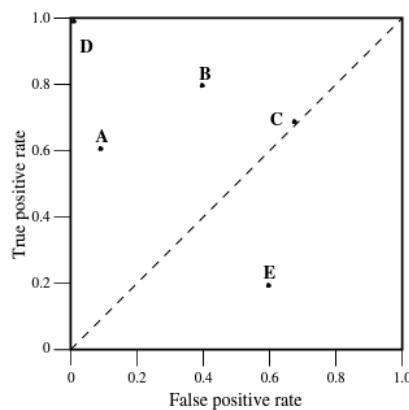
O ROC compara cada pixel da análise com as cicatrizes de MGM visualizadas em campo. Se um pixel computado instável estiver dentro do perímetro de uma cicatriz, será considerado “verdadeiro positivo” (*vp*), se estiver fora, “falso positivo” (*fp*). Da mesma forma, se um pixel computado estável estiver dentro do perímetro de uma cicatriz, será considerado “falso negativo” (*fn*) e, se estiver fora, “verdadeiro negativo” (*vn*) (ZIZIOLI, 2013; FAWCETT, 2006).

De acordo com Gorsevski *et al.* (2006), a curva é a plotagem da probabilidade de se ter um *vp* versus a probabilidade de *fp*, onde o limiar de probabilidade aceitável varia. Segundo Zizioli (2013) a realização da análise se dá a partir do cálculo de dois parâmetros:

Sensitividade (razão entre vp e $vp + fn$), no eixo y e especificidade (razão entre vn e $vn + fp$), no eixo x. Uma boa curva é aquela em que a mesma se aproxima do canto superior esquerdo do gráfico (FRATTINI *et al.*, 2010).

No espaço do gráfico ROC há uma linha diagonal que corta o gráfico ($y = x$) e representa uma predição randômica, de acaso. Fawcett (2006) demonstra o conceito do ROC através da Figura 20, para 5 modelos discretos hipotéticos, onde *True Positive rate* é a taxa vp ; *False Positive rate* é a taxa de fp .

Figura 20: Gráfico ROC hipotético com pontos discretos.



Fonte: Fawcett (2006)

A performance do ponto C (0,7 – 0,7) é puramente randômica, pode-se dizer que o ponto supõe a classe positiva 70% das vezes, mas o mesmo vale para a classe negativa. Já qualquer modelo preditivo que se encontre no triângulo inferior (ponto E, por exemplo) tem uma performance pior do que algo puramente randômico. O ponto D (0 – 1) representaria uma classificação perfeita onde não há fp e 100% das vezes o modelo previu vp .

A “*Area Under the ROC Curve*” - AUC representa a taxa de sucesso ou acurácia global do modelo e é representada pela área abaixo da curva ROC (ZIZIOLI, 2013). A AUC sempre terá seu valor variando entre 0 e 1, sendo que valores abaixo de 0,5 representam pontos abaixo da curva diagonal, ou seja, seriam predições piores que randômicas. Portanto, a AUC de fato irá variar de 0,5 a 1 e a correspondente verbal da classificação é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Classificação dos valores AUC.

Resultado	Valores
Excelente	0,9 – 1,0
Muito bom	0,8 – 0,9
Bom	0,7 – 0,8
Moderado	0,6 – 0,7
Ruim	0,5 – 0,6

Fonte: Shirani *et al.* (2018)

Zizioli (2013) aplicou quatro metodologias de mapeamento aos MGM, o SINMAP, SHALSTAB E TRIGRS e SLIP e os comparou utilizando a metodologia de validação ROC/AUC, em duas áreas distintas no norte da Itália. Em seu trabalho foi considerado dois cenários para a validação, uma com todos os tipos de MGM deflagrados e outra desconsiderando MGM deflagrados em aterros. A Tabela 8 apresenta os resultados do autor.

Tabela 8: Resultados AUC em modelos determinísticos - Zizioli (2013).

Modelos	AUC – Área 1		AUC – Área 2	
	Todos os MGM	Desconsiderados Aterros	Todos os MGM	Desconsiderados Aterros
SINMAP	0.7965	0.8326	0.7184	0.766
SHALSTAB	0.7846	0.8256	0.6573	0.7118
TRIGRS	0.7943	0.8453	0.6793	0.7810
SLIP	0.7852	0.8312	0.6824	0.6620

Fonte: Zizioli (2013)

Pradhan e Kim (2015) comparam os modelos SINMAP e SHALSTAB em uma bacia no nordeste da Coreia. Para o SHALSTAB o AUC foi de 0,824 e o SINMAP 0,6258.

Por fim, Cabral *et al.* (2022) analisaram as bacias de Mogi e Perequê em Cubatão, São Paulo, utilizando o SHALSTAB e SINMAP. Os autores criaram três diferentes cenários para cada modelo, onde variaram os parâmetros de entrada com o fim de definir qual melhor explicaria os MGM's. A Tabela 9 apresenta os resultados das AUC de cada cenário.

Tabela 9: Resultados AUC em modelos determinísticos – Cabral *et al.* (2022).

Modelos	AUC – Mogi			AUC – Perequê		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
SINMAP	0,749	0,747	0,715	0,725	0,712	0,701
SHALSTAB	0,774	0,757	0,729	0,813	0,787	0,767

Fonte: Cabral *et al.* (2022)

2.12.2 Cross-Entropy

O *Cross-Entropy* (CE), ou entropia cruzada, é uma métrica pouco usual na avaliação de mapeamentos de estabilidade de taludes. Boer *et al.* (2005) demonstram como este método pode ser valioso para simulações de eventos raros, onde pequenas probabilidades devem ser estimadas com acurácia.

Segundo Jiang e Mahadevan (2006) este algoritmo foi proposto por Kullback e Leibler em 1951 para medir a similaridade entre a verdadeira distribuição de probabilidades e a distribuição de probabilidades estimada. Baseado nisto, funções objetivas podem ser

definidas em termos da entropia cruzada esperada entre a densidade do modelo preditivo e as observações reais, neste caso, as cicatrizes de MGM. Ainda segundo o autor, quanto mais baixa a entropia cruzada, mais próxima estará a distribuição estimada da real.

Uma explicação simples do modelo é expressa em Data Science Academy (2021). Suponha que temos três classes, A, B e C e queremos encontrar ou definir B. A probabilidade real de se encontrar B na classificação é 100%, A e C 0%, respectivamente. Não há dúvidas quanto à distribuição de probabilidades e possíveis erros. Entretanto, suponha agora que o modelo previu que A tem 22,8% de probabilidade de ser B, B tem 61,9% de probabilidade de ser B e C 15,3%. Essa nova distribuição de probabilidades é próxima da verdadeira, descrita anteriormente? Quão próxima? O erro descrito pelo *Cross-Entropy* mede exatamente a proximidade da nova distribuição de probabilidades em relação a real. A Equação que representa a entropia cruzada é $CE(x, y) = -\sum_x p(x) \log q(x)$, onde a soma é feita sobre as três classes, A, B e C. Como resultado no exemplo anterior a perda, ou erro, encontrada é de 0,479. Esse seria o valor de “distância” entre a previsão feita pelo modelo e a distribuição de probabilidade real.

Duas situações se formam a depender da relação com as cicatrizes, a Equação 31 representa a entropia cruzada caso exista uma cicatriz no local x, y e, caso não exista nenhuma cicatriz, a Equação 32 é aplicada. A análise é conduzida pixel a pixel e compara a probabilidade de determinado pixel com as cicatrizes:

$$CE(x, y) = -\log(p(x, y)) \quad (31)$$

$$CE(x, y) = -\log(1 - p(x, y)) \quad (32)$$

Onde (x, y) são as colunas e linhas, respectivamente do mapa probabilístico; p é a probabilidade no elemento (x, y) .

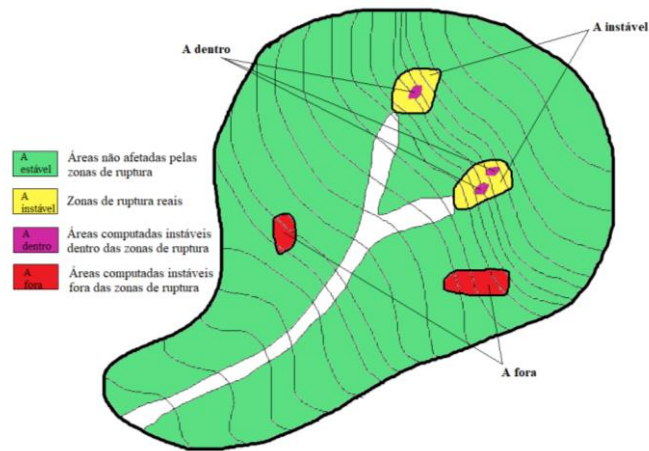
O mapa resultante desta função é um mapa de calor (*heat map*) onde, quanto mais próximo de 0 os elementos (pixels) do mapa estiverem, melhor a classificação. Se o valor é muito superior a zero será um sinal de que o erro daquele pixel em específico foi alto em relação às cicatrizes de MGM. Espera-se que ao longo do mapa tenha-se um resultado contínuo, com alguns ruídos, ou talvez, algumas regiões onde os valores estejam mais pronunciados, representando regiões de maior erro na classificação.

2.12.3 Índice de Acerto e Erro

Sorbino *et al.* (2007) desenvolveu três índices numéricos para uma avaliação direta do aproveitamento de mapeamentos de suscetibilidade, estes índices são os de acerto, erro e um terceiro, que é a razão entre ambos os índices citados.

Semelhante ao AUC, os índices fornecem um indicativo numérico de adesão do modelo construído às cicatrizes presentes na região de estudo, sendo de certa forma análogo ao CE descrito anteriormente. A Figura 21 apresenta um esquema para a sua aplicação.

Figura 21: Esquema para construção dos índices de acerto e erro



Fonte: Adaptado de Sorbino *et al.* (2007)

O índice de acerto (IA) representa a porcentagem de área considerada instável pelo modelo que coincide com as cicatrizes, representado pela Equação (32).

$$IA = \frac{A_{dentro}}{A_{instável}} \cdot 100 \quad (32)$$

Onde A_{dentro} representa as áreas consideradas instáveis e que coincidem com as cicatrizes; e $A_{instável}$ é a área das cicatrizes.

O índice de erro (IE) representa a porcentagem de áreas definidas como instável pelo modelo, mas que não coincidem com as cicatrizes, em relação a área não afetada pelas cicatrizes, representado pela Equação (33).

$$IE = \frac{A_{fora}}{A_{estável}} \cdot 100 \quad (33)$$

Onde A_{fora} é a área instável que não corresponde com as cicatrizes; e $A_{estável}$ é a área não afetada por cicatrizes.

Os autores ainda sugerem que seja calculada a razão entre os índices IA e IE, esta informação irá representar o desempenho do modelo e, segundo os autores, quanto maior a razão, melhor.

Tabela 10: Índices de acerto e erro na literatura

AUTOR	LOCAL	MODELO	IA (%)	IE (%)	$\frac{IA}{IE}$ (%)	
Michel <i>et al.</i> (2012)	Bacia do Rio Cunha	SHALSTAB	19,55	6,35	3,08	
		SINMAP	94,12	30,22	3,11	
Sisto (2018)	Bacia do Ribeirão Grande	SHALSTAB	5	4,6	1,08	
		SHALSTAB	13,9	8,6	1,61	
		SHALSTAB	43,1	17,4	2,47	
		SINMAP	81,6	37,3	2,18	
	Bacia da Praia do Porto Grande	SHALSTAB	0,2	3,4	0,05	
		SHALSTAB	16,5	8,6	1,91	
		SHALSTAB	19,5	16,3	1,19	
	Bacia do Córrego do São Francisco	SINMAP	62,3	37,1	1,68	
		SHALSTAB	3,9	3,5	1,11	
		SHALSTAB	17,8	8,1	2,19	
		SHALSTAB	43,8	15,9	2,75	
		SINMAP	91,2	35,04	2,57	
		SHALSTAB	2,1	3,1	0,67	
		Bacia das praias do Toque-Toque Pequeno e das Calhetas	SHALSTAB	6,9	8,2	0,84
			SHALSTAB	13,6	16,22	0,83
			SINMAP	43	38,4	1,11

Os índices são calculados com base na totalidade das zonas de ruptura das cicatrizes e, considerando-se a complexidade do fenômeno MGM, não se pode afirmar que todas as áreas delimitadas pelas cicatrizes são de fato instáveis no momento de ocorrência do fenômeno. A desestabilização de apenas uma pequena área, representada por poucas células instáveis, pode acarretar na desestabilização de um volume de solo muito maior devido ao relaxamento das tensões atuantes no maciço, fazendo com que um grande volume de solo presente nos arredores desta área também se desestabilize (MICHEL *et al.*, 2012).

Ainda assim, estes índices em conjunto com outros métodos de validação podem sim trazer informações robustas para o comparativo entre mapeamentos e, assim, ter uma noção da capacidade de um determinado modelo.

3 MATERIAIS

O presente trabalho se desenvolveu a partir de alguns materiais e métodos, discutidos a seguir. O método terá um capítulo à parte.

Quanto aos materiais, a base topográfica utilizada foi o modelo digital de terreno (MDT) da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina – SDS (2010), com resolução espacial de 1 metro. A partir deste foram extraídas as curvas de nível que foram utilizadas para a construção de uma malha triangular (TIN). Do TIN novamente foram extraídas as curvas de nível, das quais foi construído um MDT hidrologicamente correto com 1,1m de resolução espacial.

Da SDS também foi adquirido uma ortofotografia (SDS, 2010), com 0,39m de resolução espacial. Desta, foram delineados MGM's não constantes na base de cicatrizes de Defesa Civil de Blumenau. Foram também vetorizadas as edificações presentes na área de estudo a partir desta ortofotografia.

O mapa geológico foi confeccionado a partir do mapeamento GERCO (2003), em escala 1:100.000 e o mapa geológico de Pozzobon (2013), em escala 1:250.000.

O mapa geotécnico foi contruído a partir da sobreposição, segundo a metodologia de Davison Dias (1995), utilizando como base o mapeamento geológico resultante da união dos mapas citados e um mapa pedológico, derivado de sensoriamento remoto, utilizando como base o MDT da SDS (2010).

Com o mapa geotécnico fez-se possível amostrar os horizontes geotécnicos, com o fim de acessar a resistência ao cisalhamento dos materiais. Para tanto, fez-se necessário a utilização de um equipamento denominado *Bore Hole Shear Test*, o qual determina os parâmetros coesão e ângulo de atrito dos solos *in-situ*. O peso específico foi determinado em laboratório a partir de amostras deformadas de solo e a condutividade hidráulica saturada estimada com o auxílio da ferramenta *Rosetta 3*.

Para as análises foi escrito um *scrip* em linguagem C++ que gerará mapas SHALSTAB estáticos (com valores estáticos), de média, mediana, moda e probabilístico. Já as validações e análises estatísticas foram executadas com auxílio do *software* estatístico R.

Ademais, com o fim de comparar o resultado de análises feitas com dados de campo com os coletados na literatura, foi construído um banco de dados geotécnico. Isto foi feito pois, em muitos casos, a aquisição de dados precisos é dificultada por falta de verba ou pessoal capacitado em prefeituras e órgãos públicos. Dessa forma será avaliado o poder do código em definir áreas de instabilidade mesmo que apenas utilizando dados da literatura.

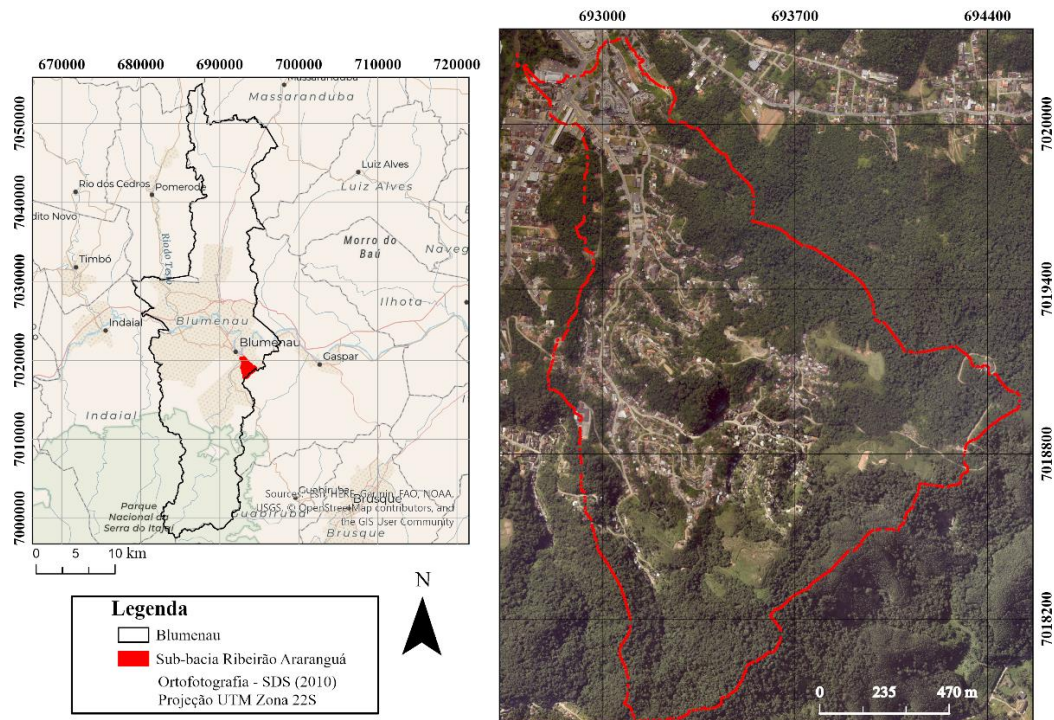
Para a construção dos materiais, edição e armazenamento foi utilizado o *software* Arcgis 10.3, desenvolvido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), Redlands, California, EUA, o Qgis versão 3.16.8, além do *software* Excel versão 2016.

4 ÁREA DE ESTUDO

Segundo Hermuche et al. (2002) as bacias hidrográficas são a base para a compreensão da organização da paisagem e a sua relação com o manejo dos recursos naturais. Uma bacia é uma porção de partes interconectadas que funcionam juntas como um todo complexo (TRENTIN & ROBAINA, 2005).

A área de estudo, denominada Sub-bacia do Ribeirão Araranguá, é uma sub-bacia localizada no município de Blumenau, Santa Catarina (Figura 22).

Figura 22: Sub-bacia do Ribeirão Araranguá – Blumenau, Santa Catarina.



A região está situada no centro-sul do município, caracterizada como uma região de exclusão social, com uma área de 2,1 km² e, em quase sua totalidade, conta com um relevo fortemente ondulado a montanhoso, segundo a classificação da Embrapa (1999). Geomorfologicamente, é composta por vales em “V” fechados com rede de drenagem multidirecional ordenada, obedecendo ao padrão retangular-dentrítico (BLUMENAU, 2010).

Dias *et al.* (2017) analisaram dados censitários para caracterizar populações expostas em áreas de risco em Blumenau. Segundo os autores, mais de 48% dos moradores da Rua Araranguá estavam expostos a esses eventos. O rápido crescimento urbano para a área eleva a possibilidade de encontros com esses eventos, Vieira & Furtado (2005) constataram crescimento na ordem de 10% entre os anos de 2001 e 2002. Na Figura 23 é apresentada uma

fotografia aérea oblíqua de uma porção da área estudada, onde é possível observar a elevada vulnerabilidade e falta de ordenamento.

Figura 23: Imagem aérea da área de estudo



Fonte: Blumenau (2010)

Vieira (2004) correlacionou diversos fatores condicionantes e potencializadores, naturais e antrópicos, dos movimentos gravitacionais de massa importantes a serem considerados na área de estudo, estes são apresentados no Quadro 12.

Quadro 12: Fatores importantes nas deflagrações dos MGM da sub-bacia.

Condicionantes		Naturais	Explicação	Sociais	Explicação
Condicionadores	Intrinsecos	Geologia	Falhas, fraturas, bandamentos, foliações e tipo de rocha.	-	-
		Pedologia	Manto de intemperismo (granulometria, porosidade, permeabilidade, resistência ao cisalhamento).		
		Geomorfologia	Forte dissecação e forma da encosta (côncava, retilínea, convexa).		
		Declividade	Média a alta (30% a 143%)		

	Extrínseco	Clima	Água de chuvas distribuídas (saturação do solo) e concentradas, observando-se a quantidade, intensidade, duração e distribuição nos setores da encosta.		
Potencializadores		-	-	Uso e ocupação	Desestabilização das encostas através de cortes e aterros; lançamento de águas pluviais e servidas; vazamentos na rede de água
				Lixo	Deposição de entulhos e lixo a céu aberto
				Cobertura Vegetal	Retirada da cobertura e plantio de espécies que potencializem os deslizamentos

Fonte: Adaptado de Vieira (2004)

4.1 PRECIPITAÇÃO

O modelo SHALSTAB baseia-se na quantidade de chuva necessária para deflagrar um MGM. A chuva é o agente deflagrador mais importante na geração da instabilidade das encostas e atua diretamente na redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais.

De acordo com Machado (2018), chuvas intensas interferem preferencialmente de três maneiras na estabilidade das encostas:

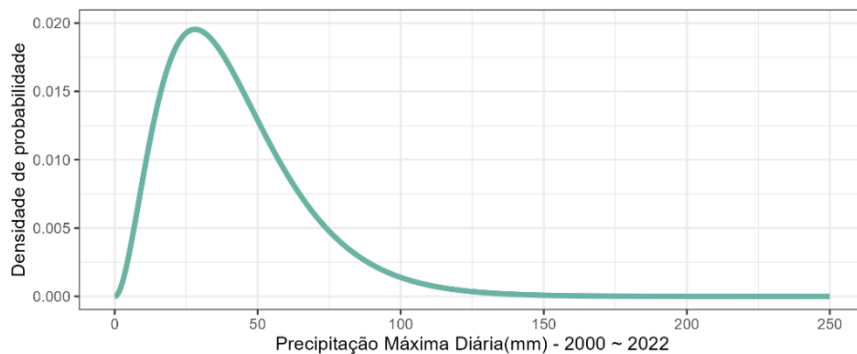
- 1) **Diminuição da coesão e ângulo de atrito** – Testes de resistência ao cisalhamento em laboratório mostram que a passagem de meio não saturado para saturado, em amostras ensaiadas, causam a diminuição da coesão e ângulo de atrito, principalmente a parcela coesão aparente.
- 2) **Aumento do peso específico dos solos** – Mesmo antes de se atingir a saturação, com o umedecimento do solo há um aumento do peso específico, o que reflete numa diminuição no fator de segurança.
- 3) **Formação de nível hidrostático** – Localmente pode ocorrer na encosta um meio mais permeável sob um meio menos permeável, criando condições para formação de um nível d'água, mesmo que de curta duração. Neste caso, poderão se estabelecer linhas de fluxos paralelos à encosta, com o mesmo sentido da tensão cisalhante, além da tensão normal diminuir com atuação da pressão neutra. Ambos os fatores favorecem a ocorrência dos escorregamentos.

A Figura 24 relaciona as precipitações máximas diárias registradas no município de Blumenau com base em dados de estações pluviométrica, modeladas a partir da função densidade de probabilidade Gamma dos volumes máximos diários, em cada mês, no período de 2000 a 2022.

A partir do gráfico pode-se observar que a densidade de probabilidade máxima da precipitação equivale a 28.1mm de precipitação e a média para o período é de 125.45mm.

Algumas datas chegam a registrar valores superando os 100 mm diários, na série há também uma anomalia extrema, ocorrida no dia 01/11/2008, com precipitação de 250,9 mm. Nesta data o município de Blumenau vivenciou um dos maiores desastres de sua história, com diversos movimentos gravitacionais de massa registrados.

Figura 24: Série histórica de precipitações na estação meteorológica do bairro Garcia – Blumenau.



Fonte: Dados da Agência Nacional de Águas (2022)

Severo *et al.* (2011, apud CORREIA, 2015, p. 395) demonstraram utilizando o método de Gumbel, para diferentes intervalos da série histórica de Blumenau, um período de retorno das chuvas para o desastre de 2008 na ordem de milênios.

Medeiros (2013), por meio do método de Gumbel, demonstrou períodos de retorno dos eventos críticos de 2011 na ordem décadas e para o evento de 2015 também.

4.2 MOVIMENTOS PRETÉRITOS (CICATRIZES)

A região de Blumenau é fortemente influenciada por eventos pluviométricos intensos, frequentemente lembrada por seus eventos catastróficos como as enchentes de 1983 e 1984 (VIEIRA; FURTADO, 2005) ou os deslizamentos de 1990 e 2008. Em 2008 ocorreu um dos piores desastres da história do município, onde foram estimadas, somente neste ano, 3000 MGM no município.

No sul de Blumenau, a tectônica, o sistema de fraturas, a morfologia do terreno, somado ao avançado estado de alteração das rochas tornam algumas áreas inadequadas a ocupação humana, por se constituírem em áreas de risco de escorregamentos (AUMOND, 2005). Segundo Vieira e Furtado (2005) foram registrados 1.954 MGM's pela defesa civil municipal, em um período de apenas 5 anos (1997 a 2001), em Blumenau. Neste mesmo período, foram registradas 149 ocorrências na sub-bacia do ribeirão Araranguá, sendo a sua área de apenas 2,1 km².

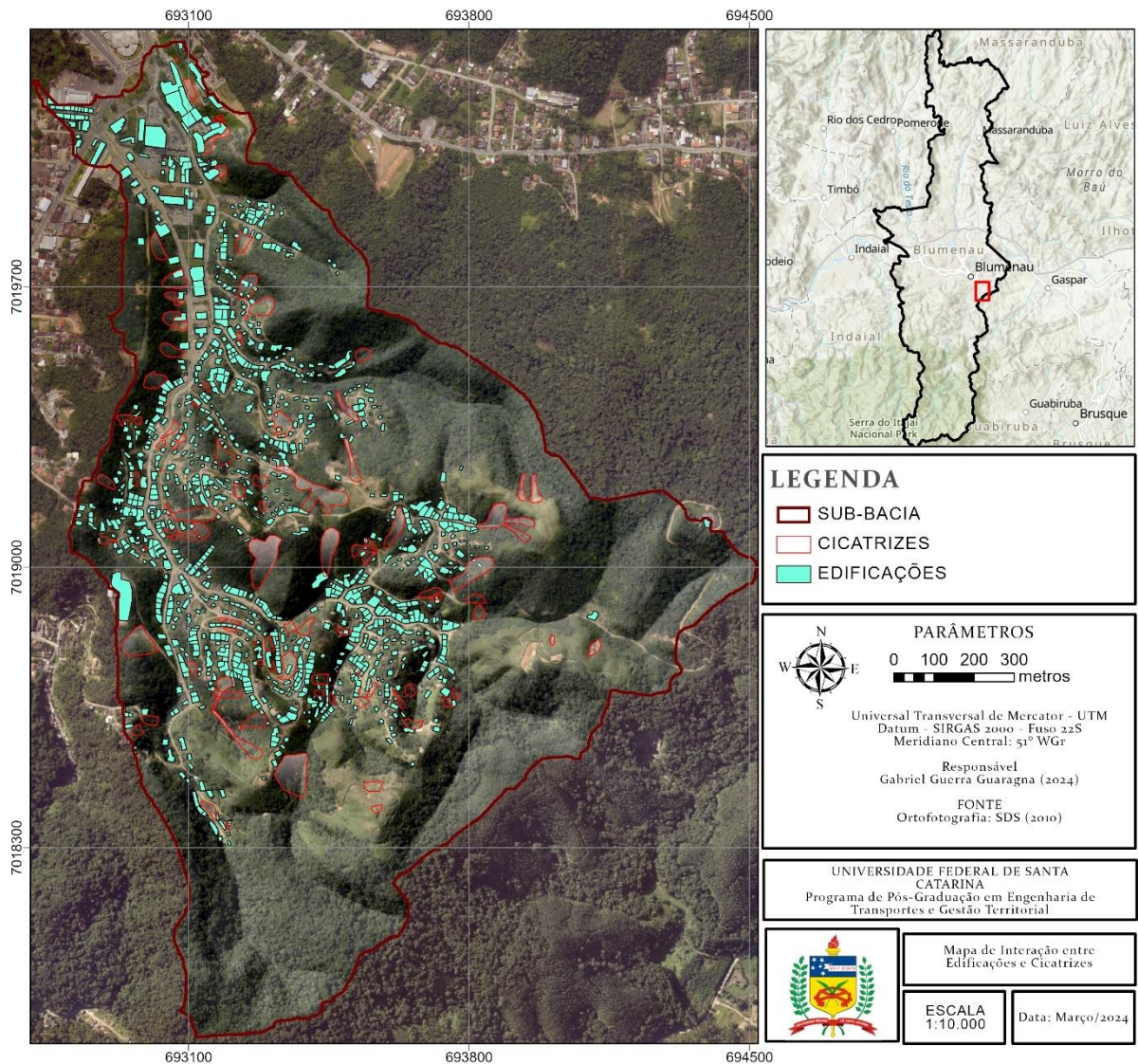
O registro de MGM's é feito pela Defesa Civil de Blumenau e conta com 1415 feições. Deste *dataset* foram extraídas as feições existentes na área da sub-bacia (Figura 25).

Os movimentos existentes na sub-bacia, de acordo com o relatório de Blumenau (2010), são rastejos, deslizamentos, corridas, quedas/tombamentos e complexos, sendo o último a combinações de mais de um tipo de movimento gravitacional de massa. As geometrias assumidas pelos MGM também diferem, em sua maioria são planares, por vezes encontram-se geometrias em cunha. Portanto, faz-se necessário para a validação posterior a execução de uma triagem dos MGM translacionais e planares apenas, pois estes são os movimentos identificados pelo SHALSTAB.

Ainda segundo o relatório, as causas internas dos MGM estão relacionadas com a redução dos parâmetros de resistência por intemperismo. As intermediárias relacionadas com a elevação do nível piezométrico, a elevação da coluna d'água em descontinuidades e a erosão subterrânea retrogressiva (*"piping"*). As externas são relacionadas com a mudança na geometria do sistema.

A profundidade média dos perfis dos MGM é de 5m e todos os ocasionaram algum tipo de dano, seja a bens públicos, privados ou ambos. Os limites internos dentro da encosta, quando possível a observação, foram o contato solo/rocha e o contato solo/solo e os limites laterais variáveis em função da rugosidade da encosta e das estruturas geológicas. (BLUMENAU, 2010).

Figura 25: Cicatrizes de MGM's na área da Sub-bacia.



*Inventário de cicatrizes cedido pela Defesa Civil de Blumenau;

** Edificações georreferenciadas a partir da ortofotografia SDS (2010).

4.3 GEOLOGIA

A geologia da sub-bacia é monótona, compreende exclusivamente depósitos sedimentares, em especial os arenitos. De acordo com Blumenau (2010) a região é marcada por uma cobertura dobrada de plataforma e sua representação é dada pelos sedimentos do grupo Itajaí e depósitos quaternários continentais. Segundo Reginatto *et al.* (2021) a área é parte da porção norte do cinturão Dom Feliciano e se encontra no sentido NE-SW.

O grupo Itajaí, na área de pesquisa, é representado pela Formação Gaspar (Figura 26), a qual é representada por arenitos feldspáticos de coloração bordô com estratificação planoparalela e cruzada acanalada (VIEIRA, 2004). Ainda, de acordo com Blumenau (2010), a formação é representada por dois membros, um arenítico e outro conglomerático, entretanto

somente o membro arenítico encontra-se presente. Este, por sua vez, é caracterizado por arenitos médios a finos, raramente intercalados com folhelhos e siltitos. No geral são afloramentos alterados e friáveis e, quando não alterados, bastante endurecidos.

Figura 26: Planos de fratura em afloramento da Formação Gaspar.

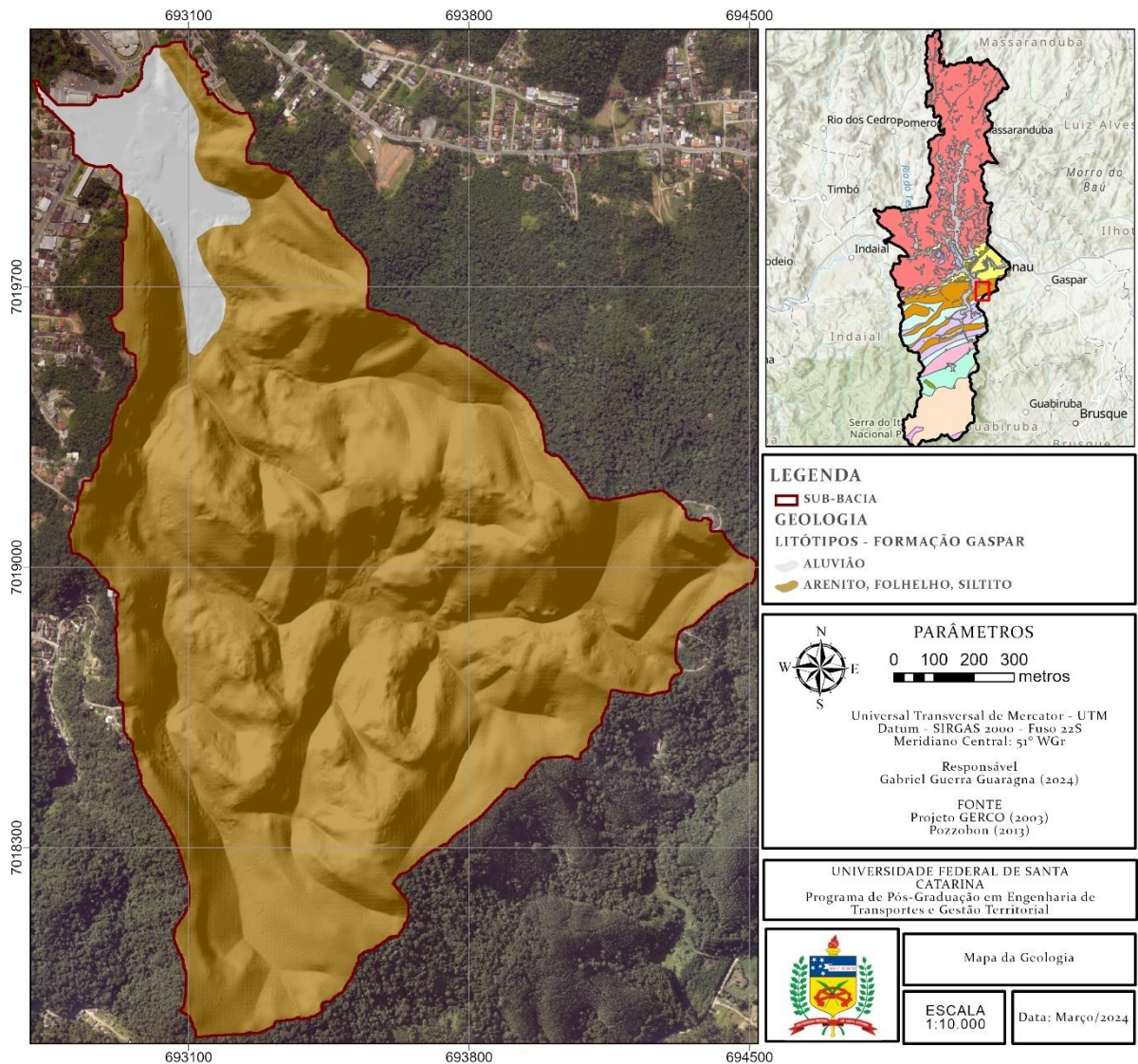


Fonte: Blumenau (2010)

No que tange as estruturas geológicas, Blumenau (2010) realizaram estudos para identificação de planos de fraqueza nos taludes a partir de estereogramas, os quais permitem a representação espacial das relações entre as atitudes das estruturas geológicas e os planos de fraqueza. A análise dos fotolineamentos indicou duas direções preferenciais das fraturas, sendo estas NE e NW. Segundo os autores o acamadamento é bastante evidenciado, especialmente nos arenitos finos, onde em seu cruzamento com os lineamentos, há o indicativo potencial para a ocorrência de MGM's. As fraturas são sistemáticas em toda a área de estudo e possuem principalmente direções NE e NW. Quanto ao ângulo de mergulho, sempre são acima de 70° e, em alguns locais, ocorrem mergulhos subverticais.

O mapa geológico apresentado na Figura 27 é um compilado dos mapas do projeto GERCO (2003), em escala 1:100.000 e o mapa geológico de Pozzobon (2013), em escala 1:250.000. A razão da compilação se dá pois o mapeamento em melhor escala, do projeto GERCO, não define a área dos depósitos quaternários continentais e também, não define a geologia das áreas com edificações instaladas. Portanto, os mapas foram unidos e editados para se ter a representação da geologia como um todo da sub-bacia.

Figura 27: Mapa geológico da sub-bacia.



Fonte: Adaptado de Pozzobon (2013) e Projeto GERCO (2003).

4.4 PEDOLOGIA

Blumenau (2010) caracterizou, em parte, a sub-bacia quanto a sua pedologia. Todavia, não foram feitos mapeamentos sistemáticos ou coletas de solo, mas sim descrições dos perfis relativamente preservados e expostos nos perímetros dos MGM. Os autores descrevem a paisagem, quanto a pedologia, como se segue:

“A despeito de não ter sido feito levantamento sistemático para o reconhecimento pedológico da área de estudo, mas tomando-se como referência o trabalho de Potter *et al.* (2004), bem como de avaliação de campo com o uso de tradagem e dos “perfis” expostos nas superfícies relativamente preservadas no perímetro dos acidentes de movimentação de massa, pode-se prever que as encostas que compreendem a área do presente estudo são compostas, em específico nas porções de menor interferência antrópica, por solos

predominantemente representantes da ordem dos Neossolos (Litólicos e Regolíticos) e em menor expressão por Cambissolos e Argissolos. Todos solos minerais, com expressão diferenciada dos processos pedogenéticos.”

O mapeamento disponível com melhor escala é o do projeto GERCO (3° fase), produzido em 2003 em escala 1:100.000 o qual, na região de estudo, demonstra apenas uma classe de solo, caracterizada como uma associação (Ca30) (SHIMIZU *et al.*, 2003):

“Cambissolo álico, Ta e Tb A moderado e proeminentemente de textura argilosa e média, ambos fase ligeiramente pedregosa e não pedregosa + Podzólico Vermelho-Amarelo álico, Ta e Tb A moderado de textura média argilosa e argilosa/muito argilosa. Relevo montanhoso e fortemente ondulado. Inclusão de solos Litólicos álicos A moderado de textura argilosa e média.”

Os cambissolos ocupam as compartimentações mais elevadas do terreno e declividades moderadas. Dortzbach *et al.* (2016) analisaram os horizontes superficiais de diversos cambissolos no estado de Santa Catarina, demonstrando a maior parte desses em regiões de elevada altitude e declividades na faixa do ondulado a forte ondulado (8 a 45%).

As depressões são localidades logo abaixo de uma forte mudança na declividade evidenciando outra classe de solos, os colúvios. São solos que foram retrabalhados, movimentados e depositados em rampas de declividades pouco acentuadas.

A classe Neossolo Litólico ocupa o espaço também elevado, mas inferior aos cambissolos e com declividades acentuadas, onde o perfil de solo é em sua maior parte raso e recente. Chagas *et al.* (2013) constatou solos desta natureza associados a afloramentos de rocha em áreas muito íngrimes e altas declividades, cerca de 63%.

Os solos do tipo Podzólico Vermelho-Amarelo são comumente encontrados na meia encosta. Ao analisar os dados referentes ao trabalho de Shimizu *et al.* (2003), os quais realizaram uma série de perfis em Santa Catarina, foi possível constatar a aparição destes solos, na maioria dos casos, em declividades elevadas e sempre nas meias encostas.

Os Gleissolos aparecem onde o terreno é pouco elevado, sem grandes declividades e há uma maior contribuição da água em sua formação.

4.5 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E PONTOS AMOSTRAIS

O mapeamento geotécnico possibilitou a definição de pontos amostrais, dos quais foram recolhidas amostras deformadas para caracterização física, bem como a definição dos pontos onde foram feitos os ensaios BST. Em suma, de acordo com as informações contidas no relatório técnico, 5 unidades geotécnicas (UG) definem a área de estudo, os cambissolos

substrato de arenito (Ca), cambissolos substrato depósito de encosta (Cde), gleissolos substrato sedimentos quaternários (GHsq), podzólico vermelho amarelo substrato arenito (PVa) e neossolo litólico substrato arenito (Ra).

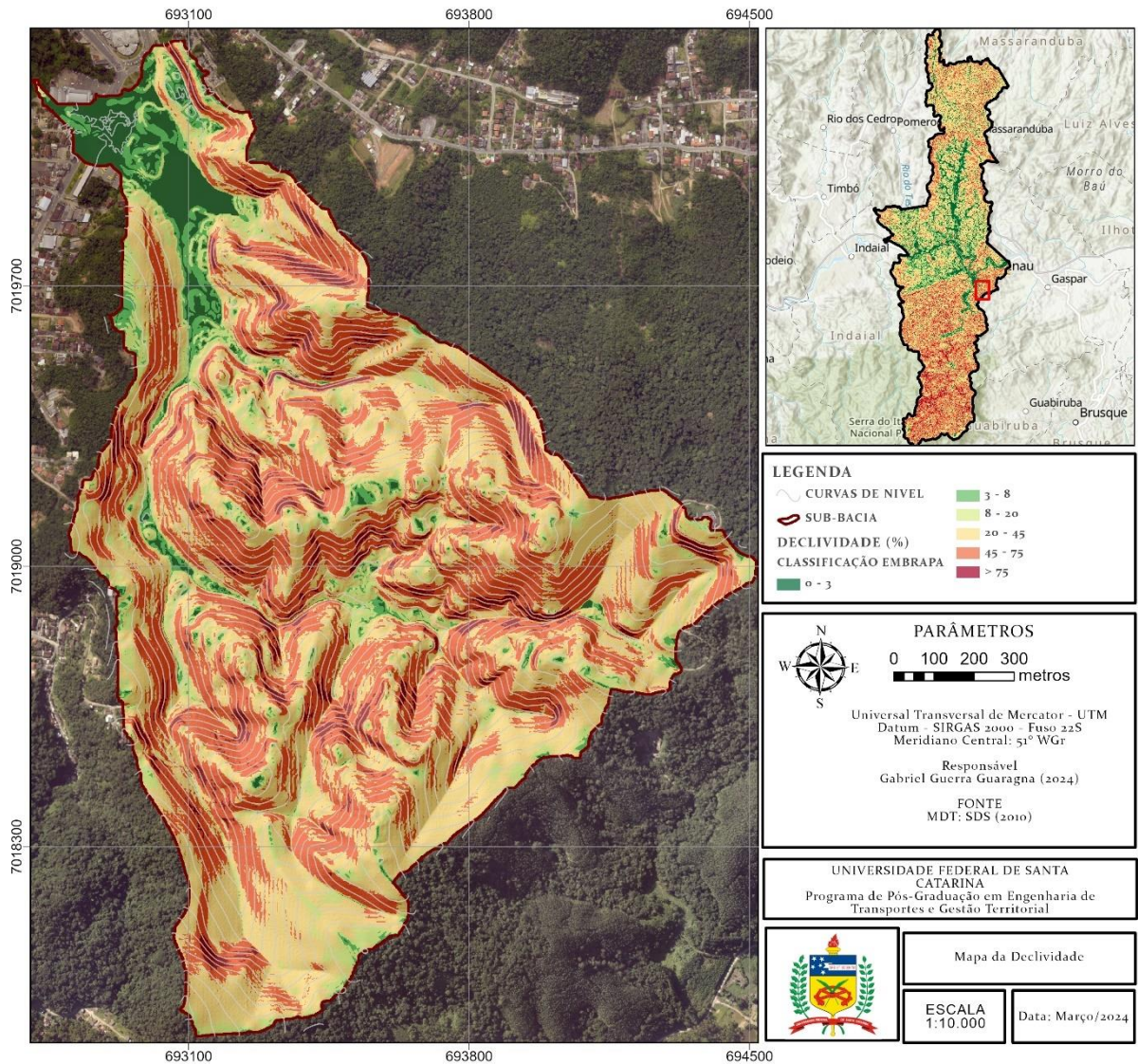
Após análise em campo, das 5 UG citadas, entendeu-se que apenas 2, o Ca e PVa, descrevem a paisagem.

4.6 VARIÁVEIS TOPOGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS

Topograficamente a sub-bacia é bastante complexa, ainda que sua altitude não seja muito elevada (variando de 1,3 a 243,6 metros), seu relevo é muito montanhoso. As variáveis declividade e área de contribuição foram construídas a partir do MDT da SDS (2010). Para tanto, as curvas de nível foram extraídas do MDT da SDS (2010) com espaçamento de 1m e foram utilizadas para a construção de uma malha triangular (TIN). Com o TIN foram novamente extraídas as curvas de nível e alimentadas ao interpolador *Topo to Raster*, gerando um MDT de resolução espacial de 1,1m. Isto foi feito pois o MDT da SDS não é contínuo ou suavizado, dessa forma faz-se necessário trabalhar seus dados através de interpolações.

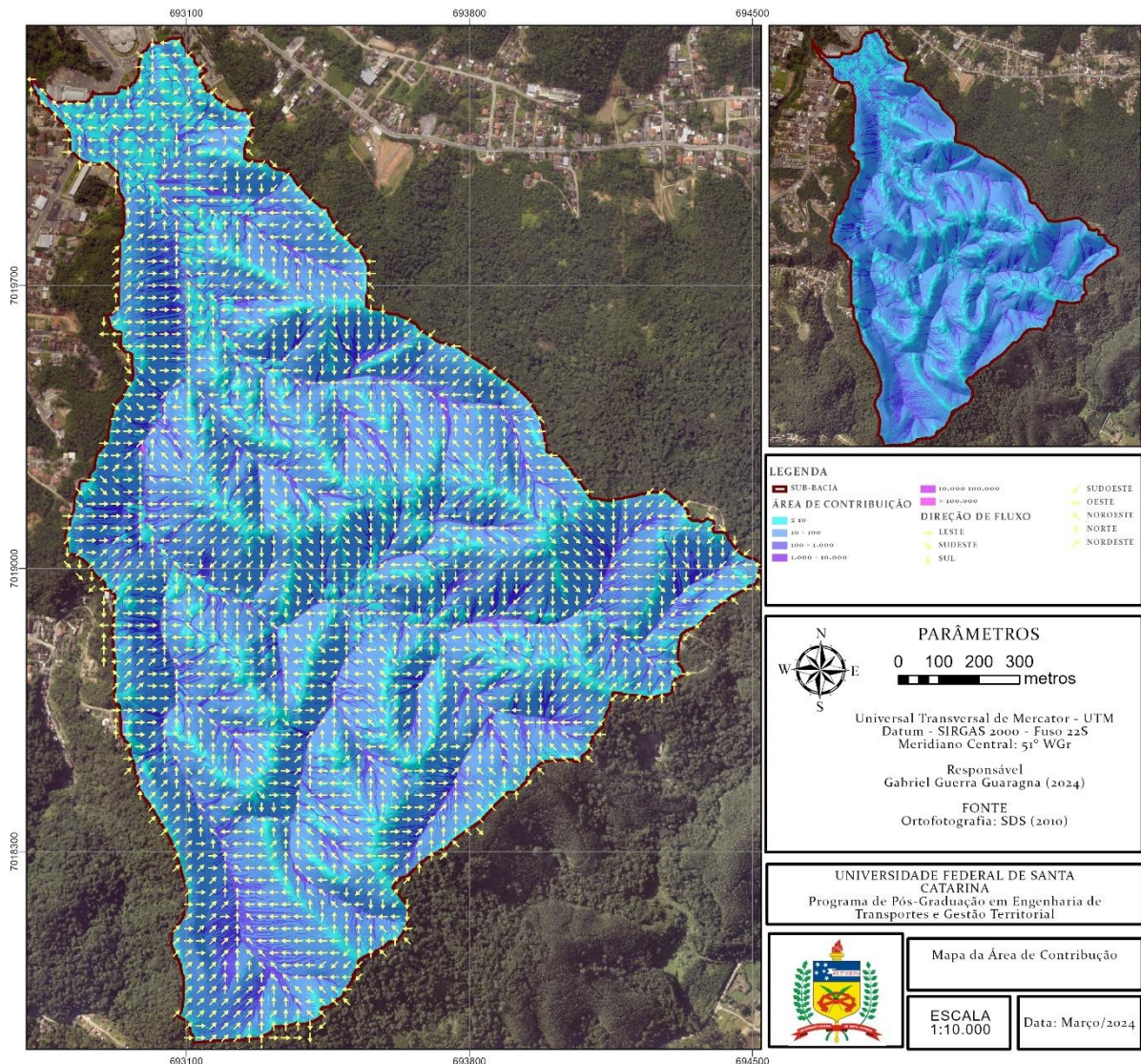
Na Figura 28 é possível observar a declividade da sub-bacia, de acordo com a classificação da Embrapa (1999). Trata-se de um local altamente indutor aos MGM em que a maior parte da sua área é representada por declividades acima dos 20 graus. 3% da área é representada por relevos planos (<3%), 4% por relevos suaves ondulados (3 a 8%), 9% são relevos ondulados (8 a 20%), 41 % da área é representada por relevos fortemente ondulados (20 a 45%), 37% é montanhoso (45 a 75%) e 5% da área é escarpada (> 75%).

Figura 28: Declividade da sub-bacia do Ribeirão Araranguá



O modelo hidrológico TOPOG é controlado em parte pela variável área de contribuição. A região a montante de uma localidade analisada com comprimento b , delimitada por linhas de maior gradiente, perpendiculares às curvas de nível, é chamada de área de contribuição (a) para uma dada célula. As zonas de saturação no terreno acontecem quando a região a montante excede a capacidade do solo de transmitir a água. A Figura 29 representa o mapa da área de contribuição na área de estudo.

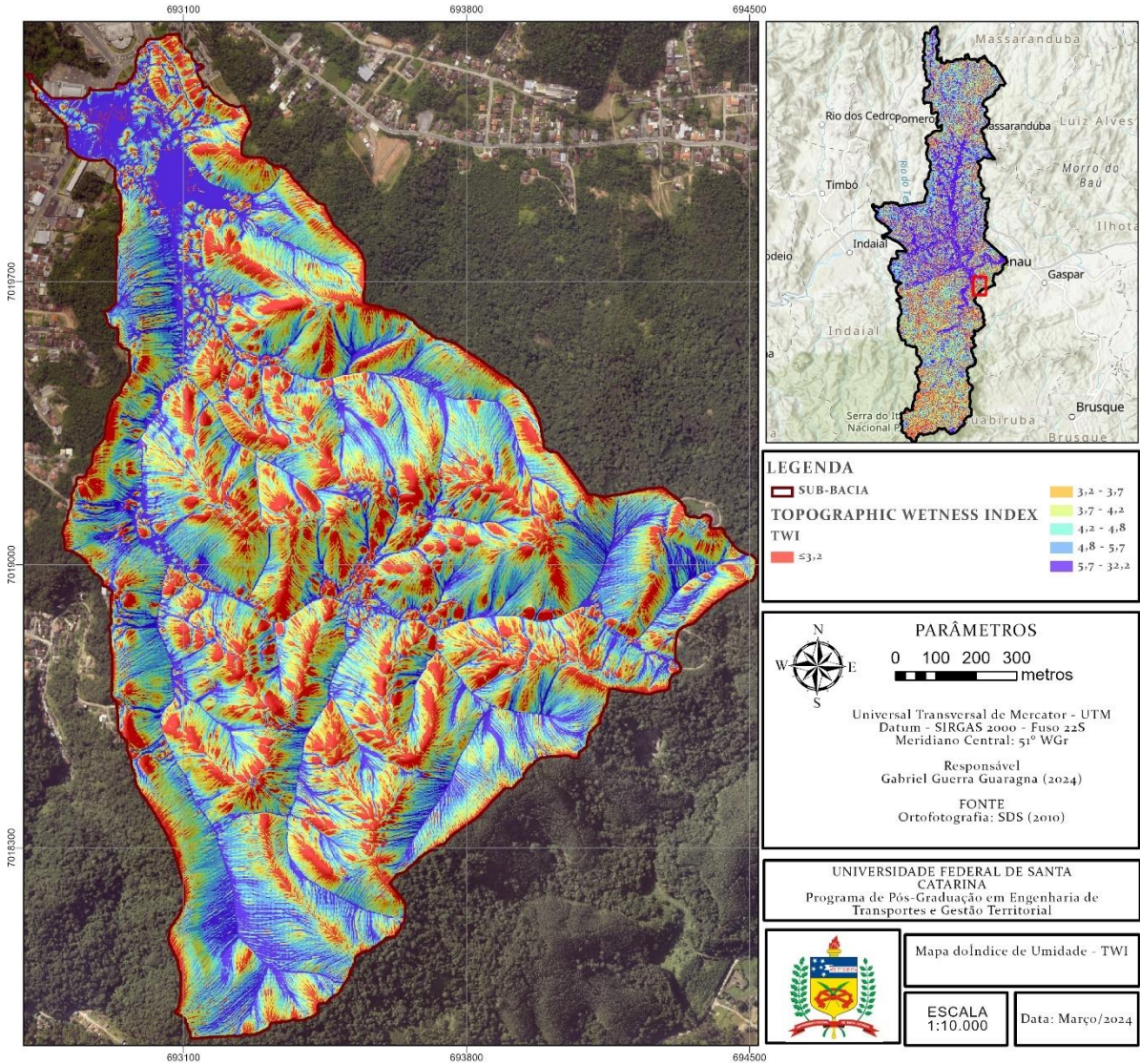
Figura 29: Área de contribuição da sub-bacia.



De acordo com Moore *et al.* (1993), como visto no capítulo 2.6, uma variável importante para explicar a profundidade do solo, a qual será apresentada a diante, é o índice topográfico de umidade (*topographic wetness index – TWI*), apresentada na Figura 30. Trata-se de uma variável calculada através do logaritmo natural da razão entre a área de captação e a tangente da declividade, ambas as variáveis apresentadas nas figuras deste tópico. O TWI é comumente utilizado para explicar o controle topográfico de processos hidrológicos e é uma variável de estado uniforme. A vantagem de se utilizar o TWI para a confecção de modelos, como a profundidade do solo, é a de que sua geração é bastante simples e pode ser acessada com apenas um modelo digital de terreno. Todavia, é importante ressaltar que é necessário que o MDT seja preciso e, de preferência, hidrológicamente correto. Caso contrário, corre-se o risco de a informação não condizer com a realidade.

O TWI é adimensional, ou seja, não possui unidade. As áreas que tendem a acumular água e também caracterizadas por declividades baixas terão valores mais elevados, enquanto que o oposto é observado para os valores baixos.

Figura 30: Índice topográfico de umidade – TWI.



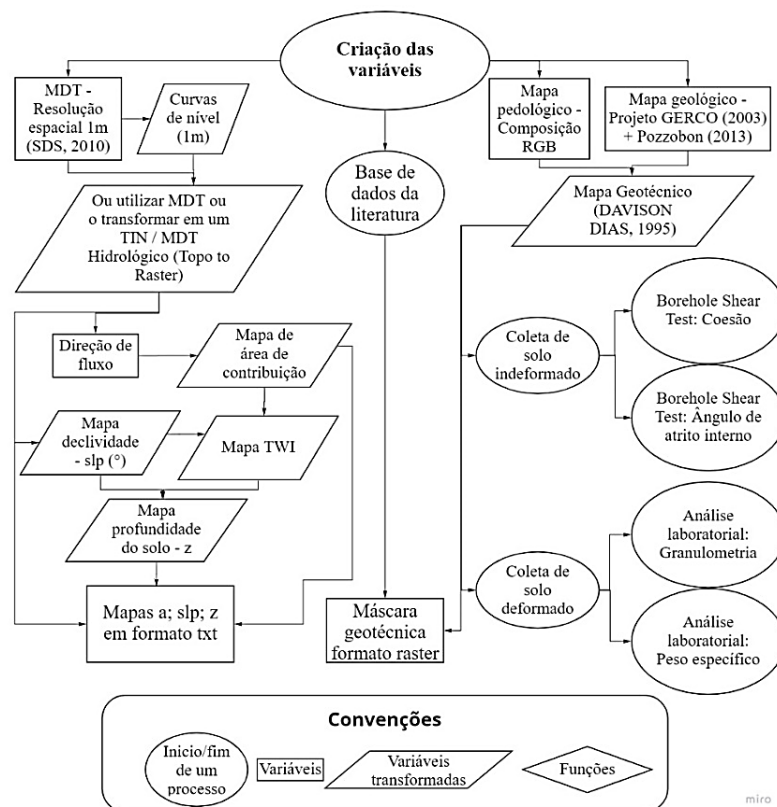
5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método deste trabalho será dividido em duas etapas, onde cada uma é representada por um fluxograma diferente. As etapas serão discutidas em tópicos separados para um melhor entendimento do processo. Alguns subtópicos também serão apresentados separadamente para maior compreensão do trabalho.

5.1 ETAPA 1: CRIAÇÃO DAS VARIÁVEIS E BANCO DE DADOS GEOTÉCNICOS

A primeira etapa, apresentada na Figura 31, diz respeito a criação das variáveis das quais são gerados os resultados, além de etapas de campo para a aquisição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos e índices físicos. Nesta etapa também foi confeccionado um banco de dados geotécnicos com o fim de comparar os resultados reais, ou seja, vindos de parâmetros e índices averiguados em campo, com a robustez do modelo em averiguar locais propícios a ruptura das encostas apenas utilizando dados coletados na literatura.

Figura 31: Fluxograma de trabalho: etapa 1 – Criação das variáveis e confecção de banco de dados geotécnicos.



O banco de dados foi desenvolvido a partir de consulta à literatura e os dados recolhidos para as mesmas unidades geotécnicas presentes na área de estudo. Os parâmetros de interesse são a coesão, o ângulo de atrito interno, o peso específico e a condutividade hidráulica saturada. Quando não averiguada a k_s , buscar-se-á pelos valores granulométricos, dos quais são estimadas as condutividades hidráulicas através do Rosetta 3.

O modelo digital de terreno a ser utilizado foi o da SDS (2010), com resolução espacial de 1m. Este MDT não é contínuo, nem suavizado, fazendo com que a transição da declividade seja abrupta de um ponto a outro. Portanto, do MDT são extraídas as curvas de nível, com espaçamento de 1m e, posteriormente, estas curvas de nível são utilizadas para a

construção de uma malha triangular (TIN). Desta malha extraem-se as curvas de nível, representando de forma mais fiel o relevo e então estas são utilizadas no algoritmo *Topo to Raster*, no Arcgis 10.3.

O algoritmo *Topo to Raster* é baseado no programa ANUDEM, desenvolvido por Michael Hutchinson nos anos de 1988, 1989, 1996, 2000, 2011. O algoritmo tem por objetivo específico a interpolação e criação de MDT's hidrologicamente corretos, usando curvas de nível ou pontos cotados. Como resultado é gerada uma matriz com resolução espacial de 1,1m, contínua, suavizada e hidrologicamente correta.

Realizado o processo de interpolação, o MDT é utilizado para a construção das variáveis declividade, em graus, área de contribuição e o TWI.

Com relação aos dados geotécnicos, a partir do mapa que será discutido a seguir, o arquivo inicialmente vetorial deve ser transformado em *raster* e serve como máscara para receber os valores aleatórios das distribuições de probabilidade dos parâmetros geotécnicos em cada iteração do modelo.

Faz-se necessário tomar o devido cuidado na construção das variáveis utilizadas para a análise SHALSTAB, visto ser necessário que todos os pixels estejam alinhados e o número de colunas e linhas das matrizes sejam exatamente os mesmos. Após a construção destas variáveis é possível transformar as matrizes em arquivos de texto (*ASCII*), que posteriormente serão alimentadas ao *software* SHALSPROB.

5.1.1 Geração do Mapa Profundidade do solo

A partir do método de Moore *et al.* (1993), discutido no capítulo 2.6, utilizam-se as variáveis TWI (positivamente correlacionada – Equação 4^a), a qual explica o acúmulo de água na região de estudo, relacionando-se, portanto, com perfis de solo mais espessos. A declividade (negativamente correlacionada – Equação 4^b), está relacionada com a erosão dos solos. Quanto maior a declividade, menor o acúmulo de água e maior a ação da gravidade, fazendo com que a formação de perfis de solos seja dificultada.

De acordo com Blumenau (2010), as profundidades de solo máximas observadas nos perfis de solo próximas as cicatrizes são de 5 metros. Dessa forma, com o fim de modelar o mapa para que se ajuste aos 5m, yimax equivale a 10m; yimin foi fixado em 0,5m; e uk para a variável declividade em 0,8 e para o TWI em 0,2.

O processo de cálculo foi feito no ArcGis, utilizando álgebra de mapas. Como são duas equações distintas, foi feita uma soma algébrica de ambas, gerando o mapa final de profundidade dos solos da sub-bacia.

5.1.2 Geração do Mapa Pedológico

Para a execução da análise utilizando o SHALSTAB faz-se necessário ter a melhor representação possível dos horizontes geológicos e pedológicos, para que se possa aferir quanto aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos horizontes geotécnicos.

Neste trabalho, portanto, foi empregada a metodologia de Hermuche *et al.* (2002), a qual correlaciona variáveis morfométricas (Capítulo 2.5.1) para descrever padrões da paisagem e assim relacionar e caracterizar as classes de solo dispostas no terreno.

O MDT é a variável fundamental para esta análise, do qual serão derivados os mapas topográficos e hidrológicos que explicarão a distribuição dos solos na paisagem. Para tanto, foi utilizado o MDT da SDS (2010), do qual foi construído um TIN (*Triangular Irregular Network* – Rede triangular), com resolução espacial de 1m.

A razão de utilização de um TIN ao invés do próprio MDT ou o MDT hidrológico é a necessidade de se preservar as características morfológicas do terreno como discontinuidades, cristas e vales.

As variáveis mais comumente utilizadas neste tipo de estudo são a declividade, área de contribuição, aspecto e altitude (HERMUCHE *et al.*, 2002; MÜHLETHALE *et al.*, 2005; SILVA *et al.*, 2013) além da curvatura horizontal e vertical (LIMA, 2013).

O realce dos padrões de relevo é executado com a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, nomeadamente, o realce através de composição colorida RGB utilizando as variáveis declividade, área de contribuição e altitude. Segundo Borges *et al.* (2007), a composição colorida é uma poderosa forma de sintetizar, numa única imagem, uma grande quantidade de informação. A associação para cada canal de cor de uma imagem morfométrica permite definir padrões tonais e texturais que caracterizam ambientes distintos.

Tendo executado a composição colorida faz-se necessário interpretar a sua informação. A classificação da composição colorida neste caso foi executada com o algoritmo da Máxima Verossimilhança (MV).

De acordo com Silva *et al.* (2013) este método avalia a variância e a covariância das categorias de padrões de resposta espectral ao classificar um pixel desconhecido. O mapa pedológico resultante do processo de classificação é um raster, o qual necessita passar por

uma etapa de edição posterior, onde são corrigidos ruídos e editados os polígonos delimitadores de cada classe de solo no formato vetorial.

É importante ressaltar que não há um mapa pedológico com escala adequada para a área de estudo, do qual se poderia averiguar a acurácia do método aplicado. Também não serão feitas campanhas de campo para a verificação da acurácia.

O modelo foi construído em respeito ao relatório técnico desenvolvido por Blumenau (2010) para a área de estudo e o relatório de Shimizu *et al.* (2003), os quais desenvolveram o mapeamento GERCO (3º fase), produzido em 2003, para a região de Blumenau. Em ambos os casos os solos foram descritos, mas não houve a produção de mapeamentos em escalas que satisfazem este trabalho.

5.1.3 Geração do Mapa Geotécnico

O mapeamento geotécnico se deu através da metodologia de Davison Dias (1995), apresentada no capítulo 2.4.1.1.

O processo inicialmente se inicia com a sobreposição do mapa geológico, o qual é construído a partir da compilação dos mapas do Projeto GERCO (2003) e Pozzobon (2013), com o mapa pedológico, gerado através da iteração de variáveis ambientais, ambos em formato vetorial.

Esta sobreposição gera como resultado um mapa ruidoso, com polígonos sobrepostos que em alguns casos podem não fazer sentido. Para averiguar os limites entre as UG's são utilizadas as curvas de nível, as quais delimitam os contatos entre as unidades.

O processo é simples, mas demanda edição e cuidado para que não haja sobreposição de polígonos indesejados.

5.1.3.1 Locais de investigação

Tendo executado o mapeamento geotécnico preliminar fez-se possível analisar a área de estudo quanto a pontos de interesse para a execução das análises de campo e coleta de amostras. A definição das áreas a serem investigadas se dá a partir de locais com perfis de solo expostos, próximos aos locais onde ocorreram movimentações gravitacionais de massa.

Dessa forma, sobrepõe-se o mapa geotécnico juntamente com as cicatrizes ao Google Earth, permitindo assim ter um panorama generalizado dos melhores locais e das melhores rotas a serem percorridas em campo.

5.1.3.2 Determinação dos parâmetros de resistência, peso específico e Condutividade Hidráulica

Os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito interno são definidos em campo, com a utilização do *Borehole Shear Test*. A abordagem segue o exposto na revisão bibliográfica (capítulo 2.7.1) e executados na condição drenada.

A primeira etapa é a realização de uma tradagem, onde é inserida a sonda cisalhante. As tradagens sempre que possível são executadas até o horizonte C da unidade geotécnica a ser ensaiada.

Em seguida é necessário nivelar o terreno, pois o equipamento necessita estar horizontalizado. Com isto faz-se possível a instalação do BST e o preenchimento do furo com água. Após o preenchimento do furo, aguardam-se alguns minutos para que o solo absorva a água.

Concomitantemente são aplicadas tensões normais no solo até que o mesmo se consolide, com o auxílio da bomba manual de ar. Consolidado o material, faz-se a anotação da tensão normal do solo. Em cada UG são aplicadas três diferentes tensões normais para que se possa obter as envoltórias de ruptura, das quais são definidas posteriormente os parâmetros de resistência.

Com o solo consolidado é possível proceder ao cisalhamento da sonda, utilizando a manivela presente na base do equipamento. Ao girar a manivela a sonda sobe pelo furo cisalhando o material, neste processo, em dado momento, será alcançado o pico da tensão cisalhante, que será identificado pelo dinamômetro. Este valor também deve ser anotado.

Com os valores de tensão normal e tensão cisalhante fez-se possível construir gráficos que os relacionam e, por interpretação, determinam a coesão e ângulo de atrito interno.

Nos mesmos locais onde são executados o BST deve-se recolher amostras indeformadas em molde metálico, com dimensões conhecidas, das quais serão definidos os pesos específicos e também amostras deformadas para a execução do ensaio de granulometria e sedimentação, além de alguns parâmetros físicos.

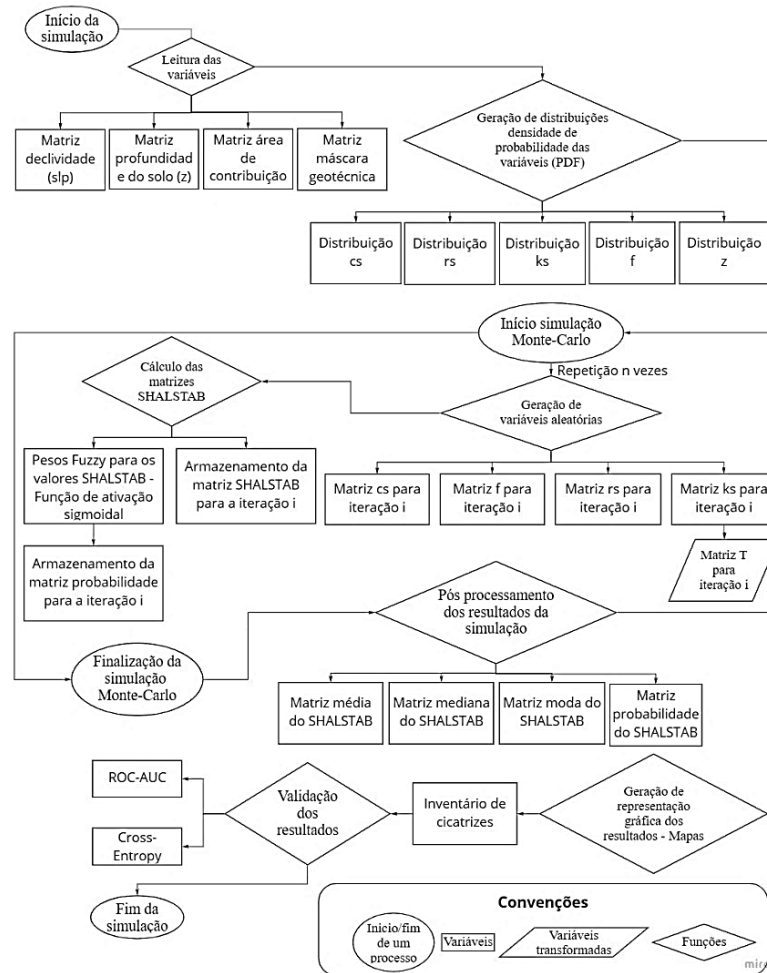
5.2 ETAPA 2: SIMULAÇÃO, GERAÇÃO DAS PDF E VALIDAÇÕES

Para a simulação probabilística do SHALSTAB foi desenvolvido um algoritmo em linguagem C++, onde a concepção e o funcionamento do mesmo estão sintetizados na Figura 32.

O processo tem seu início na leitura das matrizes das variáveis declividade (slp); profundidade do solo (z); área de contribuição (a); e a máscara geotécnica, todas em formato ASCII (texto). Para a transformação das variáveis em formato *raster* em txt será utilizado o Arcgis 10.3.

As variáveis consideradas incertas e que terão funções densidades de probabilidade aplicadas a elas são a coesão (cs); o peso específico (rs); o ângulo de atrito interno (f); a condutividade hidráulica saturada (ks); e a profundidade do solo (z). Como já discutido, estes parâmetros são repletos de incertezas, os geotécnicos são generalizados em polígonos que podem não representar a área exata de determinado tipo de solo e, a constatação de que poucos ensaios explicam a variabilidade de determinada área não é verdadeira. Já a profundidade do solo foi estimada usando equações empíricas, dessa forma tem-se por certo que este parâmetro não explica 100% corretamente a variação da representatividade espacial da profundidade do solo. Mesmo que fossem constatadas em campo essas profundidades, assim como os parâmetros geotécnicos, nunca será possível definir tantos pontos amostrais quanto o necessário para explicar toda a variabilidade espacial local.

Figura 32: Fluxograma de trabalho: etapa 2 – Simulação probabilística baseada no SHALSTAB



No Quadro 13 são apresentadas as funções densidade de probabilidade que são aplicadas a cada uma das variáveis mencionadas.

Quadro 13: PDF's aplicadas à cada variável

Variáveis	PDF
Coesão (N/m^2) – cs	Log-normal
Ângulo de atrito interno ($^\circ$) – f	Log-normal
Peso específico (kN/m^3) – rs	Gaussiana (normal)
Condutividade hidráulica saturada (m/d) - ks	Log-normal
Profundidade do solo (m) - z	Gaussiana (normal)

5.2.1 Simulação Monte Carlo

Com as PDF's construídas para cada variável inicia-se a simulação Monte Carlo, simulação esta que é repetida n vezes, de acordo com o estipulado no algoritmo. Vale ressaltar que a probabilidade aqui estudada é referente à lei dos grandes números, portanto, quanto maior o número de iterações, mais próximo à probabilidade real.

Em cada iteração (i) são selecionados, a partir das PDF's, números aleatórios para popular os polígonos do mapa geotécnico. Nesta etapa também são calculados os valores de transmissividade, os quais dependem da k_s , de z e da declividade.

Com os valores aleatórios gerados e atribuídos aos polígonos corretos inicia-se o processo de cálculo do SHALSTAB para a iteração em questão (i), a Equação (34) é aplicada neste trabalho e considera a transmissividade como atenuador de potencialidade de retenção de água no solo, portanto, reduz o grau de suscetibilidade, pois indica a capacidade do solo em drenar a precipitação.

$$\log q = T \cdot \frac{\sin \theta}{a/b} \cdot \left[\frac{c}{\rho_a \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_a} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \quad (34)$$

Dos resultados do processo de cálculo três situações são geradas:

- O SHALSTAB determinístico é gerado usando os valores médios do banco de dados ou dados de campo;
- A matriz é armazenada para a iteração em questão (i) e inicia-se a próxima iteração;
- Aplicam-se pesos para os valores contínuos SHALSTAB segundo uma função específica de ativação. Feito isto, a matriz também é armazenada e inicia-se a próxima iteração.

Como visto no capítulo 2.10 o SHALSTAB, assim como qualquer outro modelo, é repleto de incertezas. Esta constatação se reflete também nas classes geradas pelo modelo, visto não haver certeza quanto aos dados de entrada, também não há certeza quanto às classes geradas. Além disso, ao aplicar o modelo, temos como saída valores contínuos e não classes propriamente ditas.

Desta forma, em vez de considerar os valores discretos das classes SHALSTAB (Incondicionalmente estável; $> -2,2$; $-2,2$ a $-2,5$; $-2,5$ a $-2,8$; $-2,8$ a $-3,1$; $< -3,1$; incondicionalmente instável), as mesmas são padronizadas continuamente de acordo com seu grau de suscetibilidade, passando pela função de ativação.

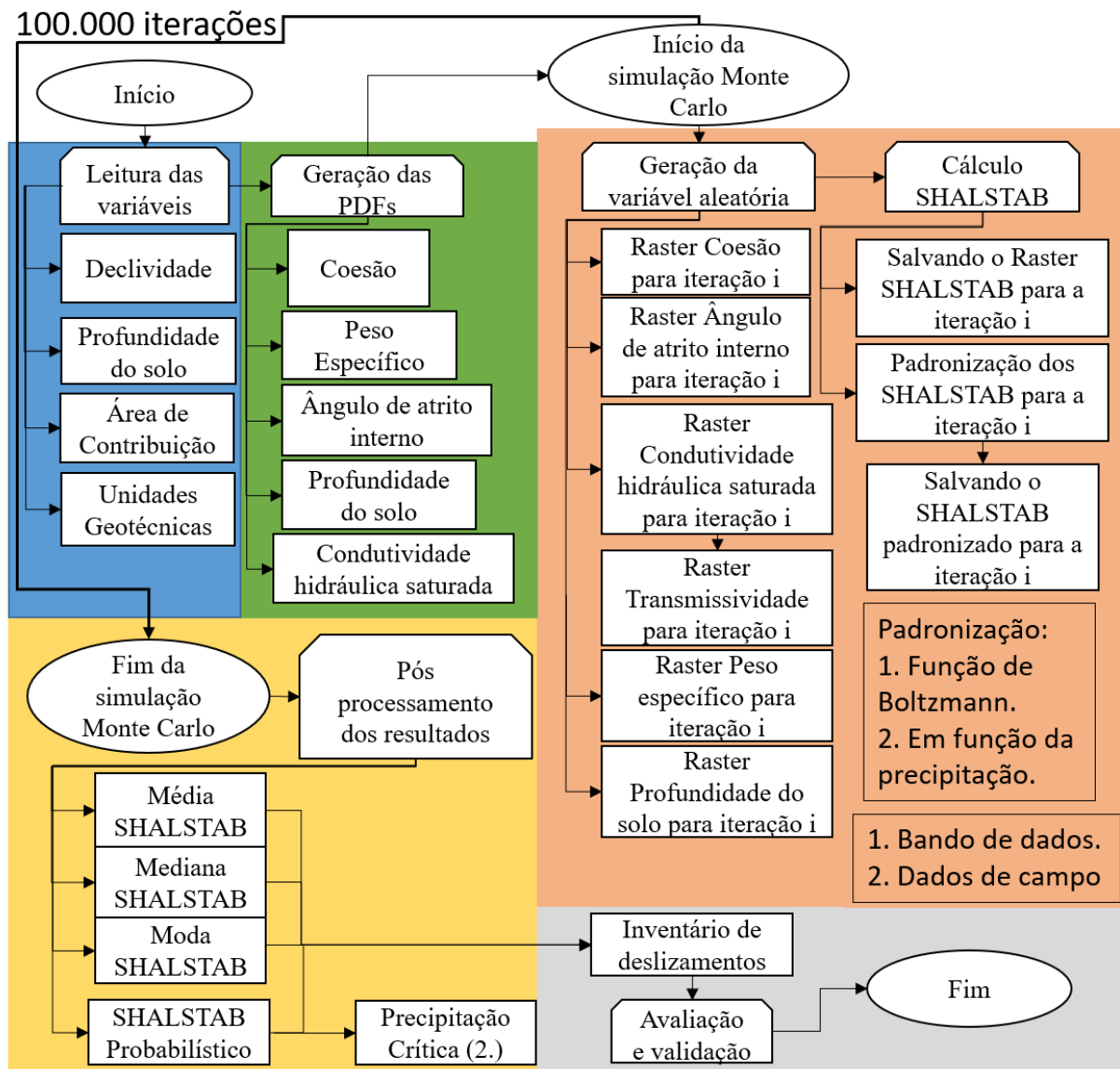
O SHALSTAB indica a quantidade de precipitação necessária para saturar o solo e causar a ruptura da encosta, portanto, todos os valores menores que $-2,2$ têm a possibilidade de romper se um evento climático tiver intensidade suficiente para saturar o solo. Todos os valores maiores que $-2,2$ receberão o peso ($P_{(st)}$) 0, ou seja, são estáveis inevitavelmente, como proposto por Dietrich e Montgomery (1998), apresentado na Tabela 5.

Existem diversas funções que podem padronizar uma série de dados, são diversas as possibilidades que podem ser utilizadas para este procedimento. Em redes neurais artificiais,

por exemplo, algumas funções comumente utilizadas são as lineares, sigmoidais/logísticas, tangente hiperbólica, ReLU, Softmax, entre outras. Qualquer função de ativação pode ser utilizada, a definição da melhor função irá variar para cada caso e conjunto de dados a ser modelado.

O fluxograma da Figura 33 exemplifica a rotina do método, separando as macros etapas em cores.

Figura 33: Rotina do método SHALSPROB



5.2.1.1 Pós processamento da simulação

Antes da simulação é gerado um mapa SHALSTAB tradicional, a partir da Equação (34). Da situação 1 mencionada são gerados três mapas com o intuito de descrever as

estatísticas do modelo SHALSTAB no decorrer das simulações Monte Carlo, a média, a moda e a mediana para cada pixel. A Tabela 11 apresenta o processo de cálculo para cada mapa.

Tabela 11: Estatísticas do modelo Monte Carlo SHALSTAB.

Estatística	Processo de cálculo
Média	$\frac{\sum \log(q)}{n}$ n = número de elementos do conjunto
Moda	É o $\log(q)$ que mais se repete em todas as iterações
Mediana	É o valor central de $\log q$ ordenados crescentemente. Se o somatório de valores for par: soma-se os dois valores centrais e divide por 2.

A matriz probabilidade resultante do SHALSTAB é calculada através da matriz de pesos ($P_{(st)}$) e a lei dos grandes números ($p_f = \frac{m}{n}$).

Para lembrar, n é o número de iterações; m é o número de vezes que o cenário de ruptura foi atingido. Neste caso não será considerado um cenário de ruptura estático (m), como por exemplo valores abaixo de -3,1 representando 100% de probabilidade de ruptura, mas sim o somatório de $P_{(st)}$ em determinado pixel.

Com o fim de ilustrar o processo de cálculo, suponha a seguinte situação: Em 1000 iterações uma célula específica foi determinada com o peso 0,25 num total de 600 vezes; 0,30 num total de 200 vezes; 0,55 num total de 200 vezes. Então, $m = 0,25*600 + 0,30*200 + 0,55*200 = 320$. A probabilidade de falha será, portanto, $p_f = 320/1000 = 0,32 = 32\%$.

Este processo será feito recursivamente em todas as células do mapa, gerando um mapa probabilístico baseado no SHALSTAB.

5.2.2 Geração dos mapas e validação

Como visto, as saídas do algoritmo são 5 mapas que a priori não podem ser aplicados em situações reais, sem que haja algum tipo de validação ou índice para que se possa representar o sucesso ou poder preditivo dos modelos.

Três modelos de validação foram apresentados na revisão bibliográfica, nomeadamente *Receiver Operating Characteristic* e *Area Under the Curve* (ROC/AUC) e *Cross-Entropy*. Ambos são calculados diretamente no algoritmo. Além destes, os índices de acerto e erro, desenvolvidos por Sorbino *et al.* (2007), também serão aplicados com auxílio de um SIG e o *Microsoft Excel*.

O primeiro método citado é aplicado em consideração ao centroide de uma determinada cicatriz, devido a explicação fornecida por Michel *et al.* (2012), de que a

desestabilização de apenas uma pequena área, representada por poucas células instáveis, pode acarretar na desestabilização de um volume de solo muito maior.

Já o segundo e terceiro método serão aplicados utilizando-se as áreas de ruptura das cicatrizes.

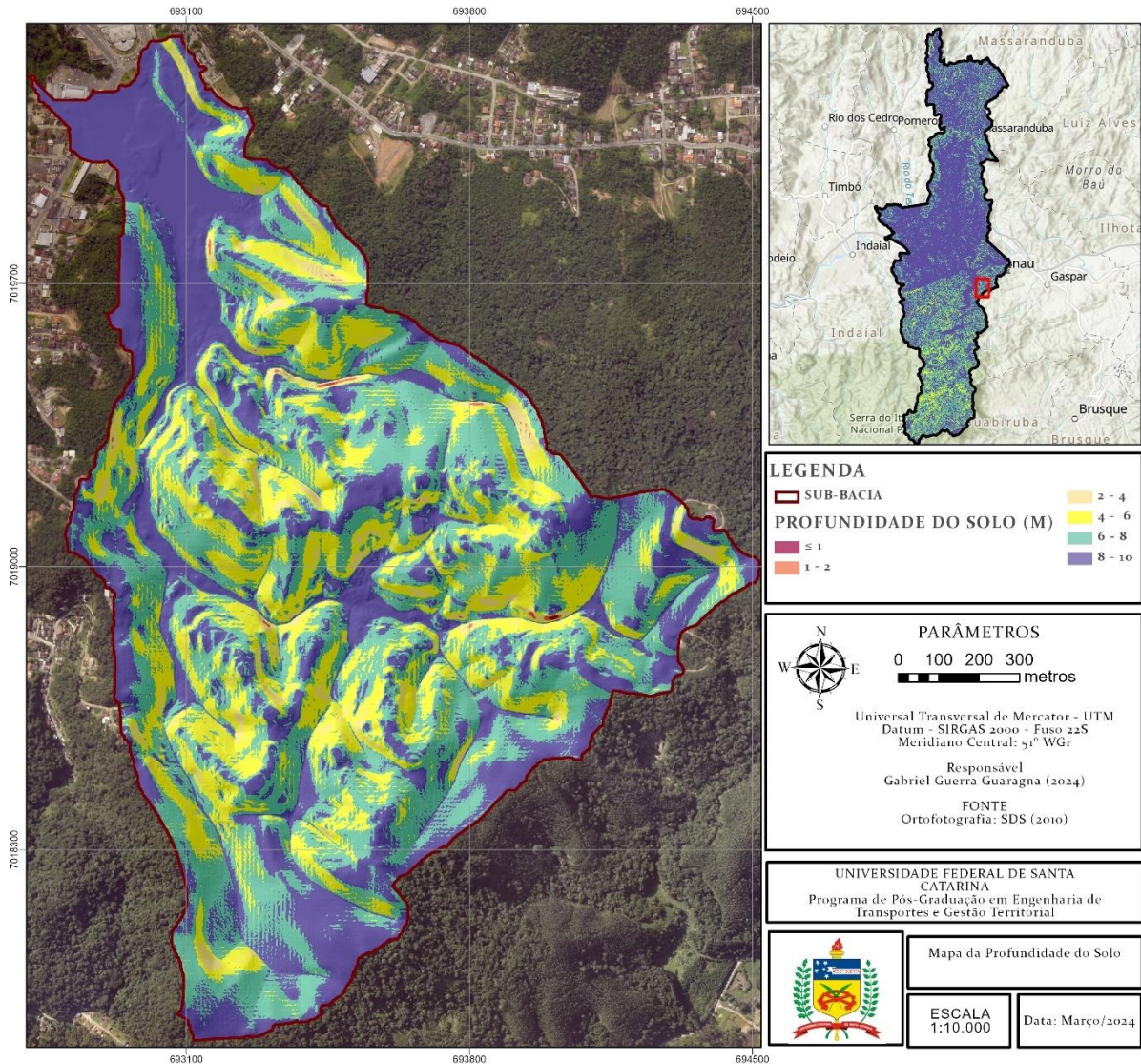
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo trata dos resultados obtidos neste trabalho e discutirá importantes considerações a serem tomadas a partir dos mesmos.

6.1 PROFUNDIDADE DO SOLO

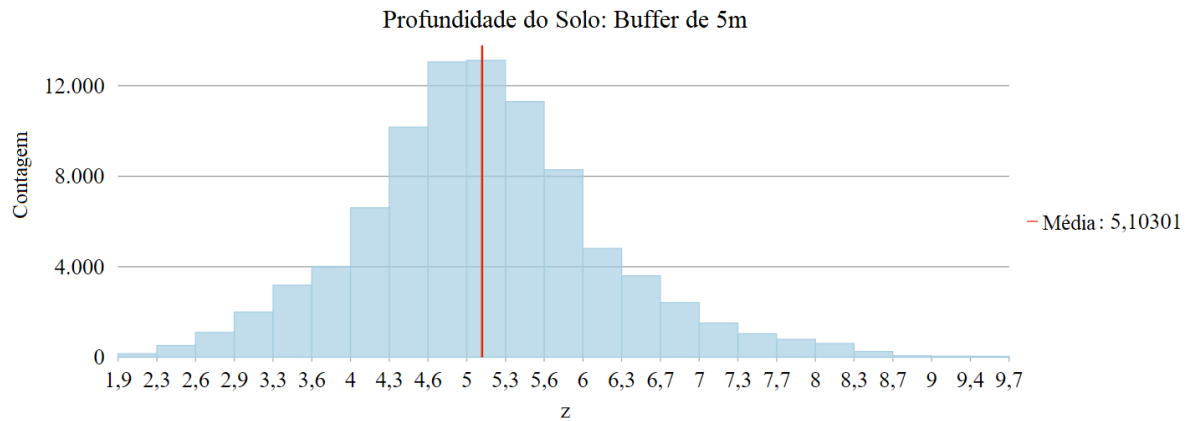
O mapa de profundidade do solo (z) foi construído com o auxílio da metodologia de Moore et al. (1993), e resulta no mapa da Figura 34.

Figura 34: Profundidade do solo na sub-bacia.



O relatório técnico de Blumenau (2010) constatou profundidades de solo por volta dos 5 metros nas proximidades das movimentações gravitacionais de massa. Com o fim de constatar esta informação no mapa gerado foram criados *buffers* de 5 metros no entorno das cicatrizes. Com os *buffers*, recortou-se o mapa de z, onde foi possível observar a média das profundidades de solo em 5,1m, o que condiz com o referido relatório (Figura 35).

Figura 35: Profundidade do solo no entorno das cicatrizes



Guaragna, Higashi e Vieik (2022) realizaram um estudo nesta sub-bacia a partir do método *Random-Forest*, no qual utilizaram o método de Moore *et al.* (1993) para construir o plano de informação relacionado a profundidade do solo. A partir deste estudo conseguiram, através de múltiplas simulações, atestar que as profundidades do solo em torno de 5m eram as que mais influenciavam na ruptura das encostas.

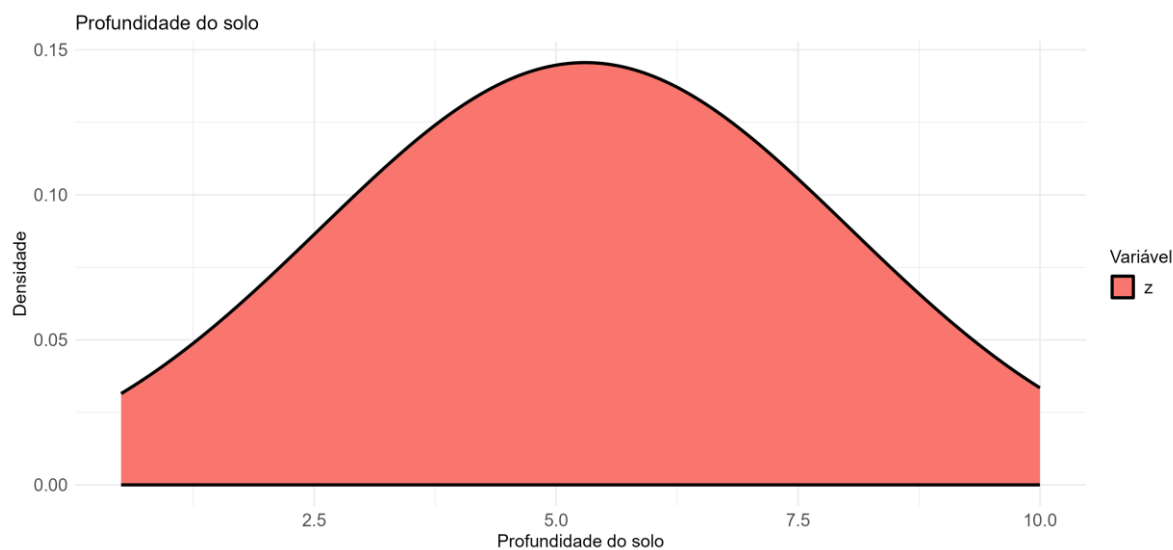
As zonas de profundidades de solo mais expressivas concentram-se em locais onde a declividade é baixa e o índice topográfico de umidade é mais expressivo. Em geral são localidades planas onde a tendência é de acúmulo de material, favorecendo a formação de perfis de solo mais profundos. Em contrapartida, locais com altas declividades tendem a apresentar maior remoção de material, muitas vezes demonstrando o embasamento cristalino. Nestas locais o TWI influencia pouco na formação do solo e a declividade age removendo o material e o depositando em locais menos declivosos.

O mapeamento não foi verificado em campo, algo que terá que ser avaliado em estudos futuros. Mesmo que fossem feitas diversas campanhas de campo, não seria possível detalhar precisamente esta variável.

Nesta perspectiva a metodologia aqui utilizada para averiguar a probabilidade se vale de PDF's para ultrapassar estas incertezas. Em cada iteração o valor de um pixel específico irá mudar aleatoriamente consoante a distribuição gaussiana.

Todavia, é importante ressaltar que a distribuição é construída a partir das estatísticas dos dados de entrada, portanto quanto mais precisos forem, melhor a distribuição explicará o a variável. A Figura 36 é o gráfico da função densidade de probabilidade para o mapa de z.

Figura 36: Distribuição densidade de probabilidade de z

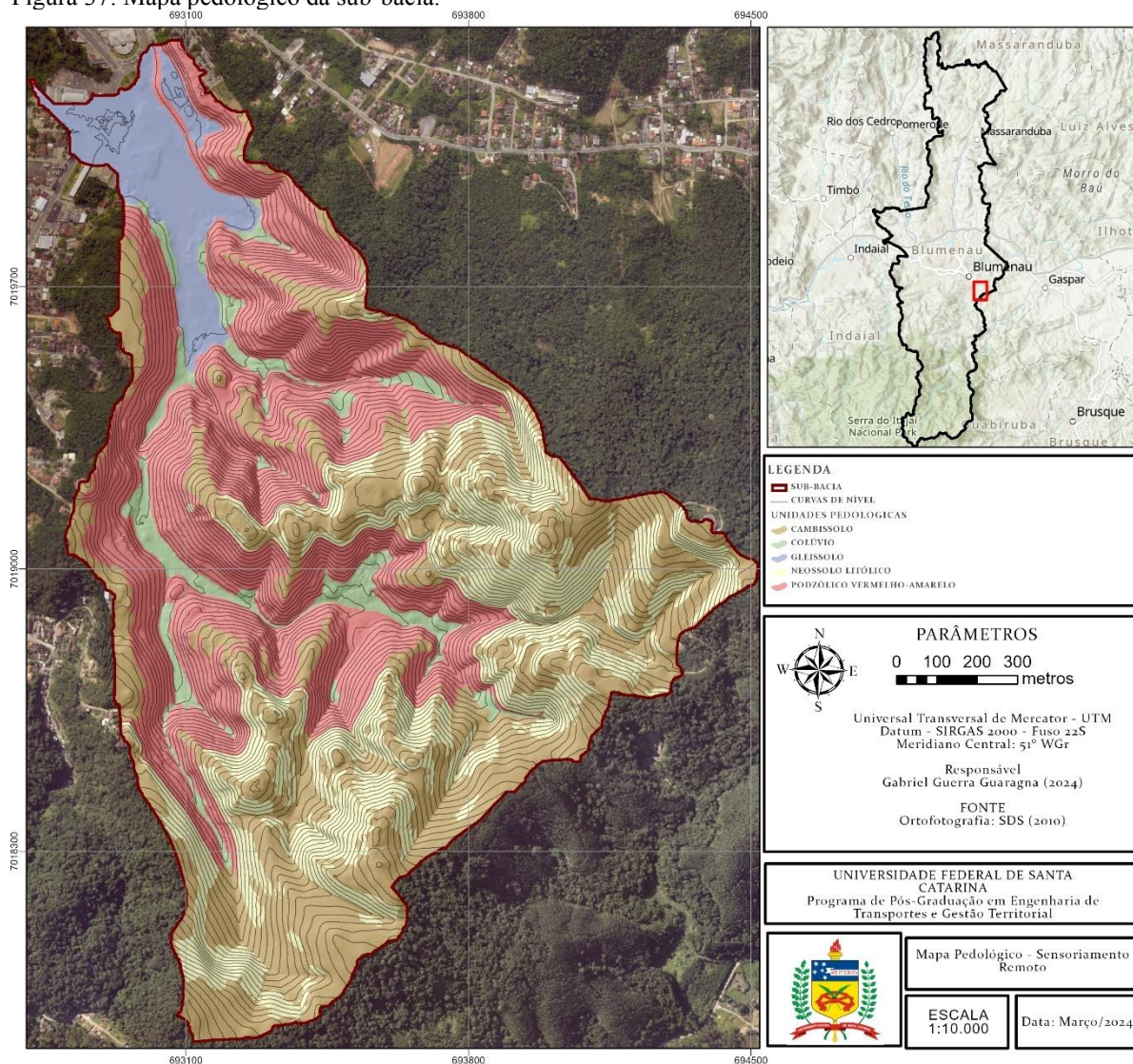


As estatísticas descritivas da amostra e da distribuição gerada a partir das amostras não diferem, para o caso de uma PDF normal.

6.2 MAPA PEDOLÓGICO

O mapeamento pedológico foi feito através de sensoriamento remoto como já explicado. O resultado do processo de classificação e correção de ruídos na classificação máxima verossimilhança é apresentado na Figura 37.

Figura 37: Mapa pedológico da sub-bacia.



Da iteração das variáveis altimetria, declividade e área de contribuição foram geradas 5 classes de solo, como pode ser visto na figura.

Como destacado pelo relatório técnico de Blumenau (2010), as áreas ao sul da sub-bacia, de menor interferência antrópica, são caracterizadas majoritariamente por Neossolos litólicos, esta constatação pode ser observada pelo mapeamento realizado.

Na Tabela 12 são apresentados os valores médios das declividades e altitudes de cada classe de solo.

Tabela 12: Declividade, altitude e área das classes de solo na sub-bacia

Classe de solo	Área (%)	Declividade Média (%)	Altitude média (%)
		Sub-bacia	Sub-bacia
Cambissolo	20,7	24,6	151
Néossolo Litólico	30,8	51,6	146,2
Podzólico Vermelho-Amarelo	36,6	50,8	65,6
Cambissolo Depósito de Encosta	5,5	19,8	96,2
Gleissolo	6,4	3,7	13,3

6.3 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR

Como resultado do processo de sobreposição entre os mapas geológico e pedológico foi gerado um mapa geotécnico (Figura 38). Este primeiro mapa passou por um processo de edição e verificação de concordância com as curvas de nível, as quais delimitam o contato entre as unidades geotécnicas (UG). As UG's representam áreas com comportamentos geomecânicos semelhantes e, para a sub-bacia em questão, foram geradas 5 unidades.

Como só estão presentes litologias areníticas na área de estudo, as áreas de cada UG e as suas relações com a declividade e altitude são as mesmas do mapa pedológico.

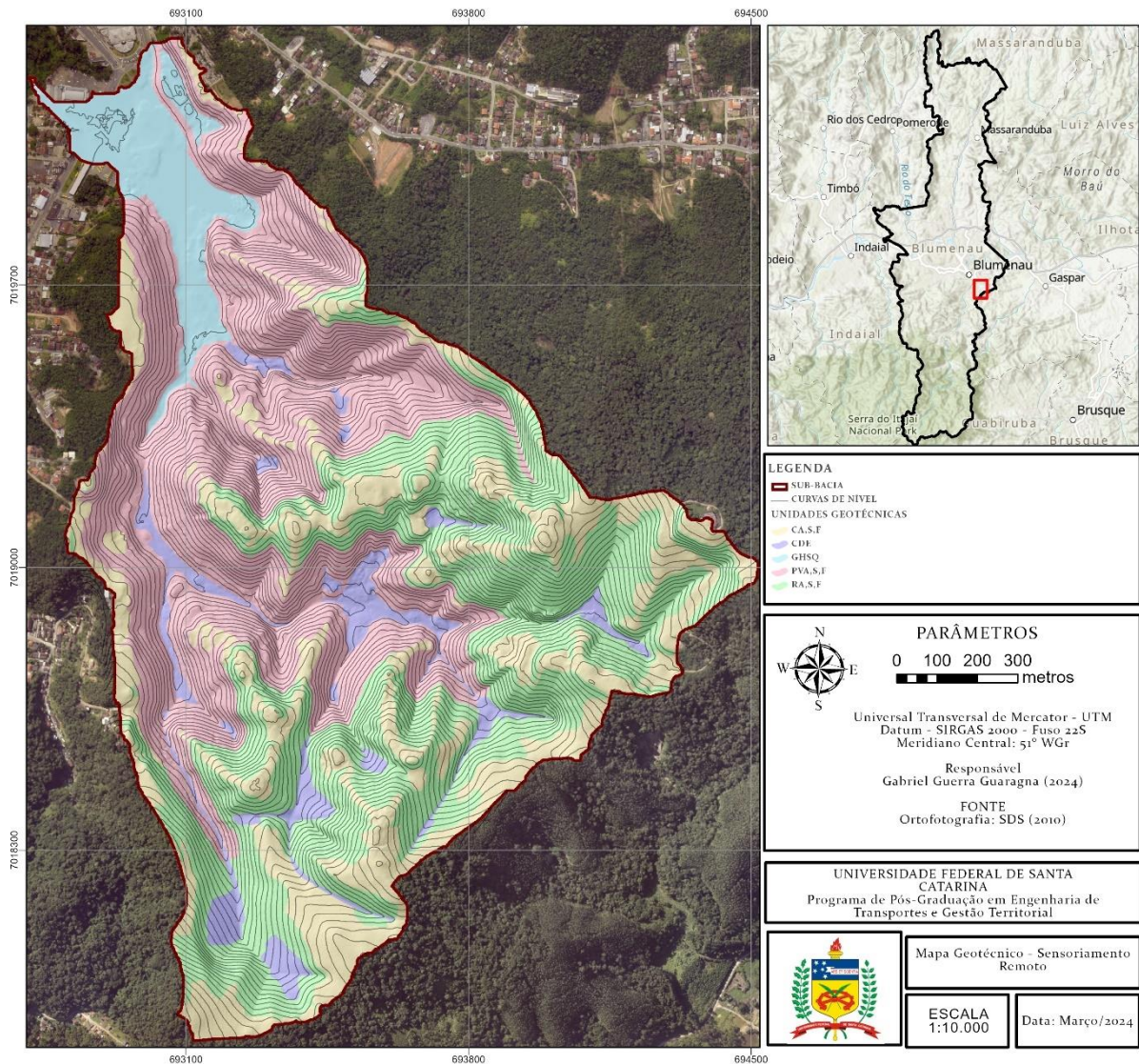
É a partir deste mapa que se possibilitou definir parâmetros de resistência de interesse para o banco de dados. É também a partir deste mapa que a máscara geotécnica foi gerada e, em cada iteração do modelo, os valores atribuídos aos polígonos irão mudar consoante às distribuições densidade de probabilidade.

Nesta etapa, o mapeamento não foi verificado em campo. Este mapeamento será utilizado para o modelamento em um cenário onde não se tem acesso a dados de campo precisos.

Outra consideração a ser feita é que foi necessário redefinir o mapa para a unidade Cde. Nesta unidade estão localizadas a maior parte das edificações da área de estudo e, quando não presentes, verificou-se através de imagem orbital mata densa. Portanto, esta unidade passará a ser a mesma de seus vizinhos mais próximos para fins de simplificação.

A unidade GHsq também não analisada pois não há MGM nesta unidade. Sua topografia é bastante plana e não há indícios de instabilidade, portanto, não existe necessidade de considerá-la nas análises.

Figura 38: Mapa geotécnico da Sub-bacia



* Consultar nomenclaturas nos Quadro 6 e Quadro 7

6.3.1 Distribuições PDF do banco de dados (BD)

O BD, como já mencionado, foi construído com o fim de comparar os resultados entre os modelos baseados em dados de campo e baseados em literatura. A coleta de amostras seguiu as UG's presentes no mapeamento geotécnico preliminar onde, por falta de dados no município em que a sub-bacia está inserida, procurou-se na literatura dados de resistência ao cisalhamento em Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A Tabela 13 apresenta o banco de dados, onde \bar{x} é a média de um conjunto de dados; σ é o desvio padrão; σ^2 é a variância; Cov é o coeficiente de variação; e n é o tamanho da amostra.

Vale ressaltar que o conjunto peso específico não foi discriminado em dados saturados, secos ou naturais.

Tabela 13: Banco de dados geotécnico e sua estatística descritiva

UG	Coesão (kN/m ²)		Ângulo de Atrito Interno (°)		Peso Específico (kN/m ³)		Condutividade Hidráulica Saturada (m/d)						
	Valores	Estatísticas	Valores	Estatísticas	Valores	Estatísticas	Valores	Estatísticas					
Ca	10,2	<i>n</i>	13	26,4	<i>n</i>	13	16,8	<i>n</i>	11	0,07	<i>n</i>	11	
	11,8			32			18,8			0,01			
	15,8			22,7			18			0,02			
	5,7	\bar{x}	10,64	26,3	\bar{x}	32,71	17,53	\bar{x}	17,53	0,37	\bar{x}	0,94	
	15,8			29,7			16			0,88			
	9,4	σ	7,41	33,3	σ	6,58	15,4	σ	1,29	0,16	σ	1,53	
	8,4			26,5			17,8			0,89			
	9,3			33,5			18,4			2,53			
	25,9	σ^2	54,91	45,4	σ^2	43,29	17,6	σ^2	1,68	0,37	σ^2	2,35	
	20,6			35,3			19,5			0,043			
	3,6			42,9			18,4			4,99			
	0,8	<i>Cov</i>	69,65	34,9	<i>Cov</i>	20,12	16,1	<i>Cov</i>	7,39	4,99	<i>Cov</i>	163,08	
	1,0			36,3			16,1						
Pva	2,4	<i>n</i>	9	27,1	<i>n</i>	9	<i>n</i>	5	0,38	1,16	<i>n</i>	18	
	6,1			26					1,07				1,83
	8,4	\bar{x}	5,94	33	\bar{x}	34,01	17,1	\bar{x}	17,85	0,21	0,07	\bar{x}	0,54
	13,9			39,6			17,53			0,06			
	8,7	σ	3,88	35,5	σ	4,90	18,1	σ	0,69	0,65	0,13	σ	0,88
	4,5			39,6			18,9			0,44			
	1,5	σ^2	15,02	37,71	σ^2	24,04	17,6	σ^2	0,47	3,43	0,08	σ^2	0,77
	4,8			33,15			0,028			0,08			
3,2	<i>Cov</i>	65,20	34,47	<i>Cov</i>	14,41	<i>Cov</i>	3,85	0,005	0,007	<i>Cov</i>	161,85		
Ra	10,3	<i>n</i>	8	25	<i>n</i>	8	<i>n</i>	4	1,55	0,22	<i>n</i>	19	
									0,84				0,11
	9,9	\bar{x}	8,16	35	\bar{x}	32,63	18,9	\bar{x}	19,13	0,47	1,41	\bar{x}	1,41
	5			35			0,12			0,46			
	9,7	σ	3,86	31,9	σ	5,56	19,4	σ	1,08	0,45	1,56	σ	2,38
	11,2			30,5			17,8			0,13			
	5	σ^2	14,88	28	σ^2	30,96	20,4	σ^2	1,17	0,31	0,79	σ^2	5,64
	12,7			43,6			0,17			0,17			
	1,5	<i>Cov</i>	47,26	32	<i>Cov</i>	17,05	<i>Cov</i>	5,65	0,79	7,62	<i>Cov</i>	168,41	
									8,37				

Fontes: Alves (2018); Müller (2015); Sbroglia (2015); PIBIC-2017-2019 / Projeto LGA; PIBIC-2017-2083 / Projeto LGA; PIBIC-2017-2071 / Projeto LGA; Bastos (1999); Feuerharmel (2007); Bim (2015); Martins (1994); Prietto (1996); Specht (2000); Casagrande (2001); Heineck (2002); Pinheiro (1991); Porto (2018); Zanon (2021); Bastos (1999); Orlandini (1991); Pereira (2006); Ferreira (1998); Almeida (1998); Antunes (2017); Ziegler (2013); Alho *et al.* (2007); Pedron (2001); Cunha (2015); Bartolomeu (2009); Pinheiro e Davison Dias (1995); Michel *et al.* (2021).

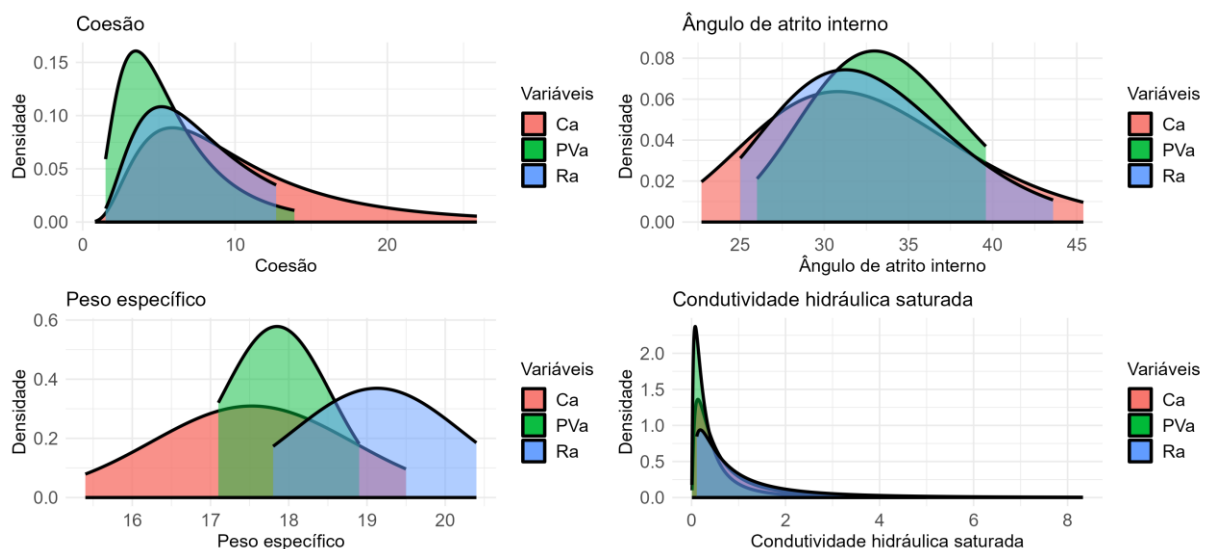
Da Tabela 13 pode-se notar que há uma grande variabilidade para os solos, mesmo com o mesmo comportamento geomecânico. As variáveis com maior variabilidade são a condutividade hidráulica, seguida da coesão e, por fim o peso específico.

A utilização das PDF's tem como objetivo contornar incertezas relacionadas com a assimetria dos parâmetros e a sua continuidade no terreno. Ao se valer dessas funções, após n iterações, foram definidos diversos cenários possíveis, levando em consideração diferentes combinações dos dados, mas sempre dentro do espaço amostral.

A partir do BD apresentado foi possível construir as funções densidade de probabilidade para as variáveis coesão, ângulo de atrito interno, peso específico e ks, respeitando o limite máximo em que cada unidade apresentou.

A Figura 39 apresenta as distribuições de todas as unidades geotécnicas para os diferentes comportamentos geomecânicos.

Figura 39: PDF's BD. A) log-normal da coesão, B) log-normal do ângulo de atrito interno, C) gaussiana do peso específico, D) log-normal da condutividade hidráulica saturada.



Como comentado, a condutividade hidráulica possui altas ordens de magnitude e, por essa razão, adequa-se muito bem às funções lognormais. A variabilidade presente nesta variável é muito elevada, para o caso dos Neossolos, por exemplo, varia de 0,11 a 8,37 m/d.

6.4 RESULTADOS DE CAMPO: MAPA GEOTÉCNICO E DADOS GEOMECÂNICOS

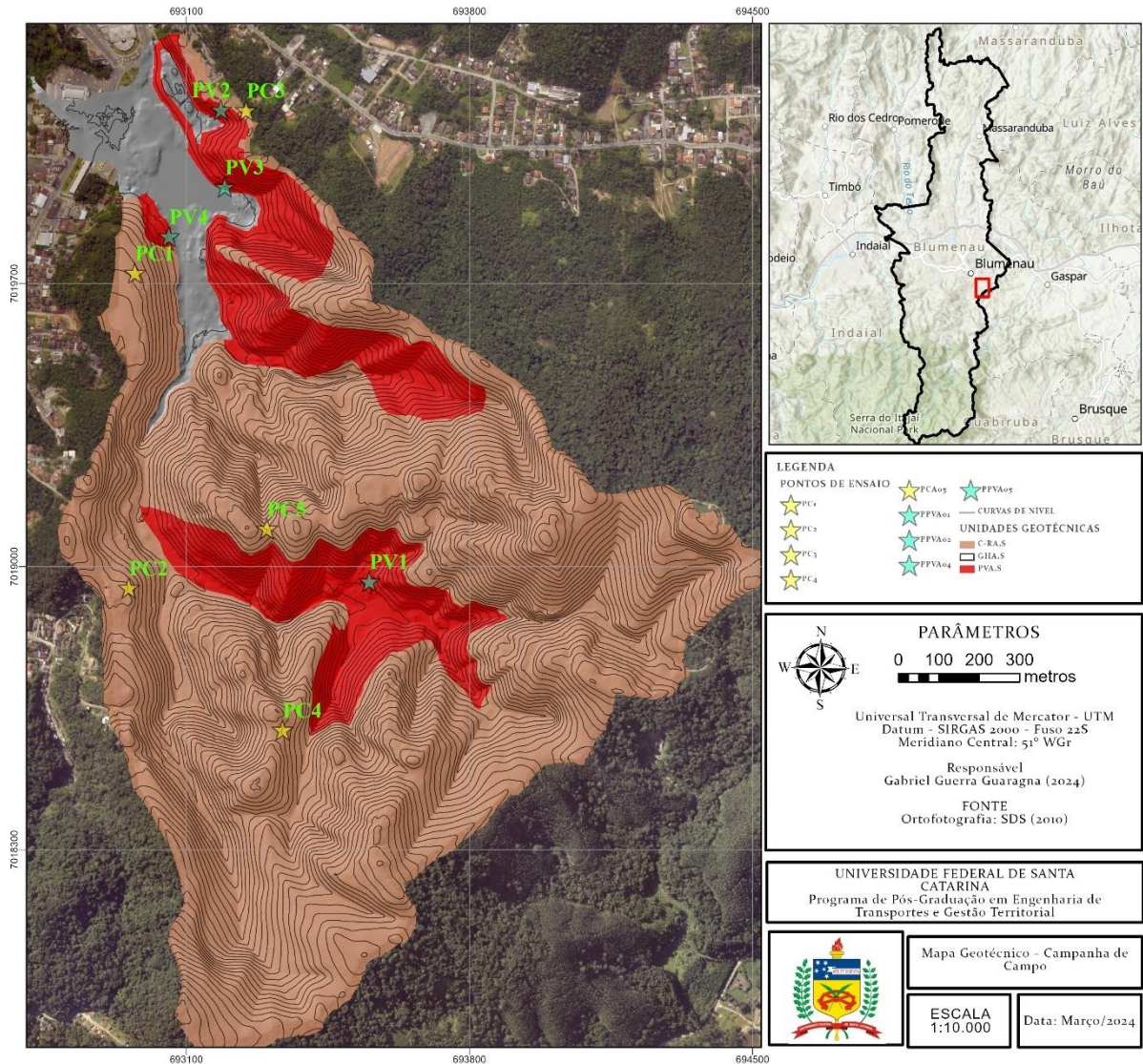
As etapas de campo permitiram avaliar a resistência ao cisalhamento das unidades geotécnicas presentes na área de estudo. Foram executados 9 pontos de ensaio utilizando o BST, dos quais foi possível apenas analisar os Cambissolos (5 pontos ensaiados) e os Podzólicos vermelho-amarelos (4 pontos ensaiados). Os Neossolos, apesar de pouco resistentes em comparação com as pequenas porções de rochas areníticas encontradas na área

de estudo, ainda são demasiadamente consolidados para permitir o ensaio utilizando o BST, sob o risco de destruir o equipamento. Além disto, nos locais onde são encontrados Neossolos e também as rochas areníticas (Figura 38) há quase, senão sempre, associação destes com os Cambissolos. Portanto, o mapa geotécnico sofrerá uma mudança, nas localidades onde verificou-se a presença de Neossolos serão utilizados os valores referentes aos Cambissolos, devido a impossibilidade de utilização do BST.

O mapeamento apresentado na Figura 38 sofrerá mudanças após uma avaliação cuidadosa em campo a respeito dos limites impostos para cada unidade. Notou-se também que a gênese dos solos no local de estudo possui influência de rochas siltosas. Como mencionado por Blumenau (2010), há na área de estudo siltitos, apesar de raras exposições de perfis dessa rocha, há influência da mesma na formação dos solos da sub-bacia do Ribeirão Araranguá. Portanto, no mapa geotécnico foi considerada uma associação de rochas areníticas e siltíticas na nomenclatura das UG's.

A Figura 40 apresenta o mapa geotécnico considerado para a análise utilizando os dados de campo, onde os pontos no mapa são os locais onde foram feitos os ensaios, PC são os pontos relacionados às UG's Cambissolo e PV Podzólicos vermelho-amarelo.

Figura 40: Mapeamento geotécnico final e pontos de ensaio.



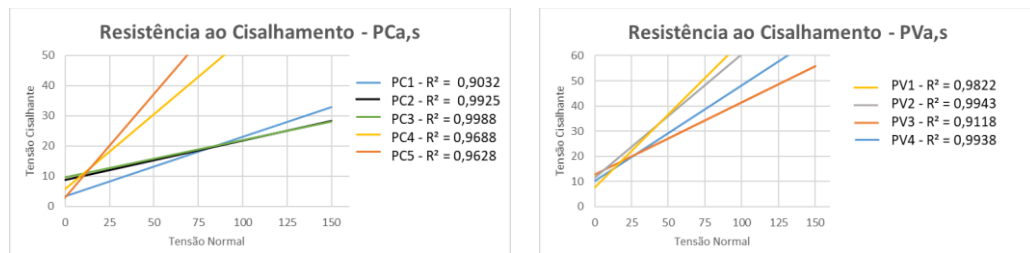
Nos pontos apresentados foram realizados os ensaios BST bem como a recolha de amostras indeformadas em molde metálico para a determinação do peso específico, além de amostras deformadas para a caracterização granulométrica, que serão apresentadas em capítulo subsequente. No Quadro 14 são apresentadas as coordenadas de cada ponto de ensaio.

Quadro 14: Coordenadas dos pontos ensaiados.

Ponto	Coordenadas (UTM Zona 22s)
PC1	692.973,13E / 7.019.725,20N
PC2	692.957,80E / 7.018.946,76N
PC3	693.248,17E / 7.020.127,43N
PC4	693.338,15E / 7.018.595,52N
PC5	693.299,40E / 7.019.092,92N
PV1	693.552,35E / 7.018.962,73N
PV2	693.185,41E / 7.020.128,85N
PV3	693.195,32E / 7.019.938,10N
PV4	693.056,94E / 7.019.815,58N

Os gráficos contendo os pontos BST ensaiados em campo e traçadas as linhas de tendência, de onde são estimadas a coesão e ângulo de atrito interno, são apresentadas na Figura 41.

Figura 41: Envoltória de ruptura dos solos ensaiados.



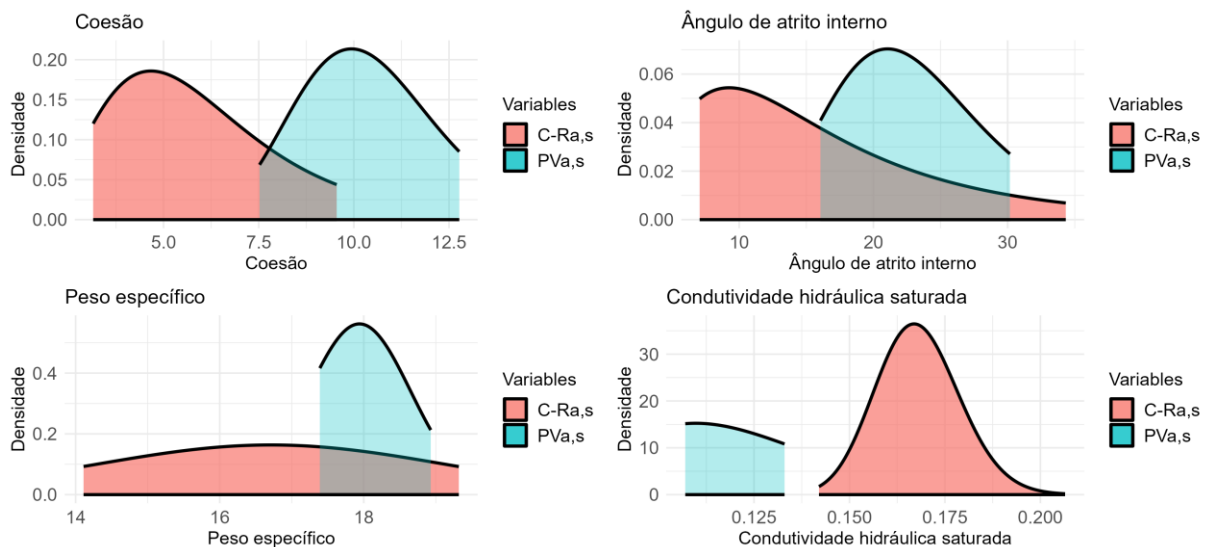
Na Tabela 14 são apresentados os dados referentes à resistência ao cisalhamento, condutividade hidráulica (estimada através das granulometrias) e peso específico dos 9 pontos de ensaio.

Tabela 14: Dados BST, peso específico e estimativa de ks.

UG	Coesão (kN/m ²)		Ângulo de Atrito Interno (°)		Peso Específico (kN/m ³)		Condutividade Hidráulica Saturada (m/d)	
	Valores	Estatísticas	Valores	Estatísticas	Valores	Estatísticas	Valores	Estatísticas
PC1	3,29	<i>n</i> 5	11,12	<i>n</i> 5	19,23	<i>n</i> 5	0,186	<i>n</i> 5
PC2	8,80	\bar{x} 6,09	7,39	\bar{x} 17,25	14,83	\bar{x} 16,71	0,208	\bar{x} 0,1675
PC3	9,55	σ 2,68	7,05	σ 12,38	14,11	σ 2,44	0,1543	σ 0,011
PC4	5,65	σ^2 7,20	26,34	σ^2 122,67	19,32	σ^2 4,78	0,146	σ^2 1,22E ⁻⁴
PC5	3,15	<i>Cov</i> 44,01	34,33	<i>Cov</i> 71,77	16,06	<i>Cov</i> 14,60	0,142	<i>Cov</i> 9
PV1	7,52	<i>n</i> 4	30,18	<i>n</i> 4	18	<i>n</i> 4	0,107	<i>n</i> 4
PV2	11,49	\bar{x} 10,46	26,15	\bar{x} 23,31	17,46	\bar{x} 17,94	0,113	\bar{x} 0,119
PV3	12,77	σ 1,95	16,05	σ 6,17	18,93	σ 0,71	0,121	σ 0,028
PV4	10,07	σ^2 3,80	20,86	σ^2 28,52	17,39	σ^2 0,38	0,133	σ^2 8,17E ⁻⁴
		<i>Cov</i> 18,64		<i>Cov</i> 26,47		<i>Cov</i> 3,96		<i>Cov</i> 17

A partir dos dados apresentados na Tabela 14 foi possível a definição das funções densidade de probabilidade de cada parâmetro, as distribuições são truncadas, ou seja, apresentam a continuidade da densidade de probabilidade dos dados entre o intervalo máximo e mínimo dos dados reais adquiridos e apresentados na Tabela 14. Na Figura 42 são apresentadas as PDF's.

Figura 42: PDF's BST. A) log-normal da coesão, B) log-normal do ângulo de atrito interno, C) gaussiana do peso específico, D) log-normal da condutividade hidráulica saturada.



Para o peso específico, observa-se uma gama muito maior de dispersão dos Cambissolos. Por vezes os Cambissolos apresentavam muitas raízes em seu interior, fazendo com que os pesos específicos apresentassem um valor bastante menor do que os Cambissolos com relíquias de rocha arenítica intacta. Os Podzólicos, por se encontrarem em meia encosta, não apresentavam nem raízes, nem relíquias de rocha intacta, dessa forma são solos mais homogêneos, não apresentando tanta variação.

A dispersão maior na condutividade hidráulica saturada é verificada para os Cambissolos, mas ainda assim, não há grande variabilidade nos parâmetros. As distribuições se assemelham com uma distribuição normal.

6.4.1 Granulometria e Índices físicos

Com o fim de melhor entender o comportamento dos solos na sub-bacia foram determinados alguns índices físicos, nomeadamente o limite de plasticidade (LP – NBR 7180), o limite de liquidez (LL – NBR 6459), o índice de plasticidade (IP) e a umidade (Tabela 15).

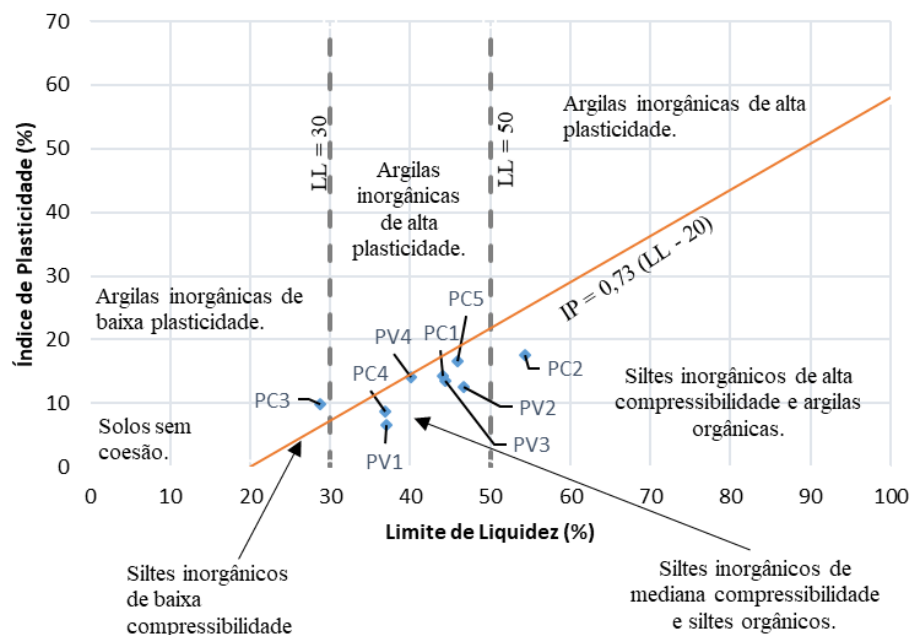
Tabela 15: Índices físicos dos solos estudados.

Ponto	Umidade (%)	LP (%)	LL (%)	IP (%)
PC1	24,0	29,74	44,12	14,38
PC2	28,2	36,83	54,31	17,48
PC3	3,0	18,98	28,78	9,80
PC4	30,0	28,15	36,86	8,71
PC5	20,2	29,34	45,95	16,61
PV1	29,8	30,55	37,08	6,53
PV2	23,2	34,06	46,68	12,62
PV3	22,3	30,74	44,3	13,56
PV4	14,2	25,95	40,06	14,11

O entendimento do comportamento dos solos frente à umidade é de extrema importância quando os solos possuem uma fração considerável de silte e ou argila. De acordo com Caputo (1996), o comportamento plástico dos materiais é fundamentado nas características de tensão deformação. O corpo é considerado elástico se recuperar a forma e o volume primitivos ao cessar a ação das forças externas que o deformava. Por outro lado, o corpo será plástico caso não recupere a sua forma original ao cessar a ação deformante.

Na prática, nunca haverá uma condição 100% plástica ou elástica, portanto, os índices apresentados na tabela indicam o quanto mais plástico ou elástico é o solo. O gráfico de plasticidade apresentado na Figura 43 representa a classificação dos solos de acordo com o gráfico de plasticidade de Casagrande (CAPUTO, 1996), onde foram plotados os pontos referentes à Tabela 15.

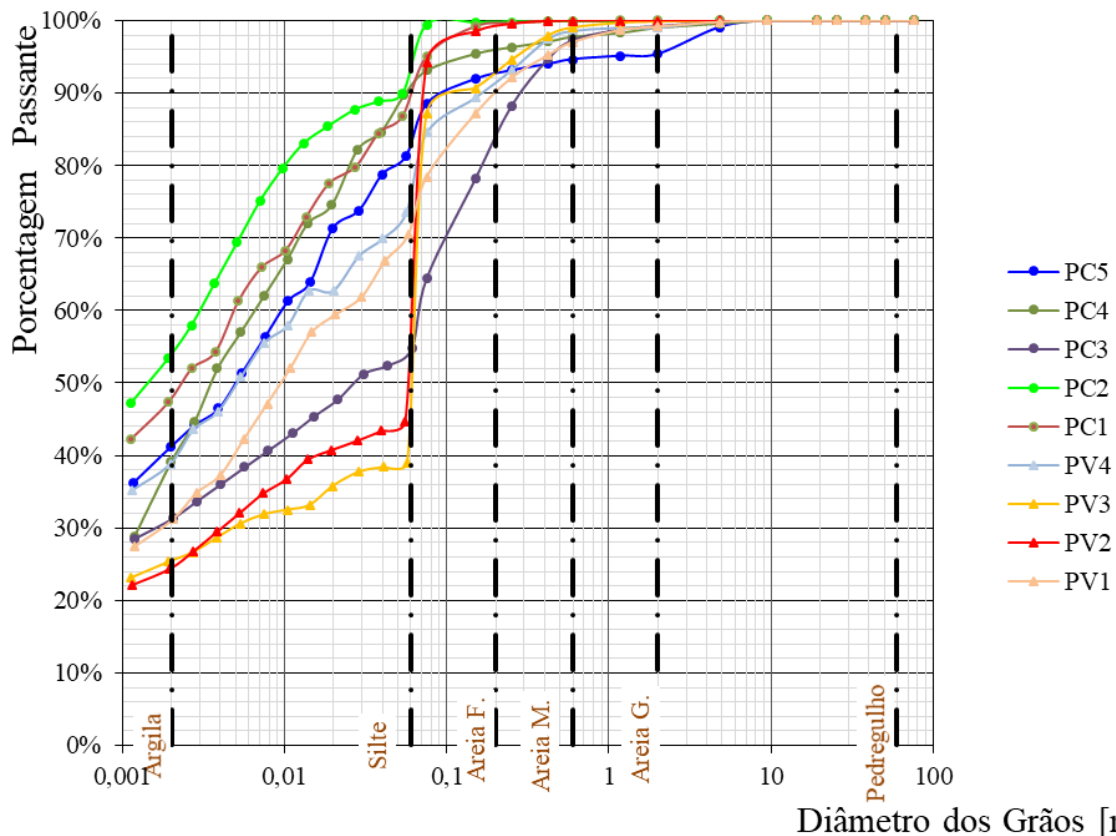
Figura 43: Gráfico de plasticidade.



Observa-se, portanto, que os solos na região são majoritariamente siltes inorgânicos de mediana compressibilidade. Este fato pode explicar o motivo de algumas amostras apresentarem ângulos de atrito tão baixos, o que não seria o esperado caso a classificação dos materiais fossem areias. Ademais, a formação Gaspar, da qual a área de estudo faz parte, apresenta siltitos como litologia subordinada aos arenitos. Portanto, estes siltitos deram origem ao silte presente nos solos da região e o arenito à areia, com maior contribuição de silte.

Tal constatação de que há uma maior contribuição de silte pode ser verificada no gráfico da Figura 44, em que são apresentadas as curvas granulométricas dos solos estudados.

Figura 44: Curvas granulométricas dos solos estudados.



Para uma melhor compreensão da distribuição apresentada nos gráficos, são expostos na Tabela 16 as aproximações das frações granulométricas.

Tabela 16: Distribuição granulométrica em porcentagens.

Ponto	Argila	Silte	Areia F	Areia M	Areia G	Pedregulho
(%)						
PC1	51,99	43,12	4,05	0,83	0,01	0,0
PC2	57,99	41,41	0,30	0,13	0,01	0,16
PC3	31,36	23,40	23,41	19,10	1,94	0,79
PC4	44,71	48,40	2,32	2,34	1,23	1,0
PC5	44,24	44,32	3,37	2,71	0,72	4,64
PV1	31,18	47,23	8,72	9,89	2,12	0,86
PV2	26,81	67,45	4,17	1,49	0,07	0,02
PV3	26,64	60,53	3,50	8,33	0,82	0,17
PV4	43,59	40,93	4,90	9,20	0,46	0,92

Verifica-se que, no geral, os Podzólicos encontrados na meia encosta apresentam maiores teores de silte e menores teores de argila, enquanto que as localidades mais elevadas, onde os Cambissolos se encontram, há maior contribuição de argilas. Em relação aos arenitos, não parece que tenham uma grande contribuição na formação dos solos da região de estudo, mas sim, os siltitos. Estes provavelmente eram as camadas mais superficiais e frágeis de rocha, que foram intemperizadas mais fortemente que o arenito, gerando os solos com alto teor de silte e argila e menor teor de areia.

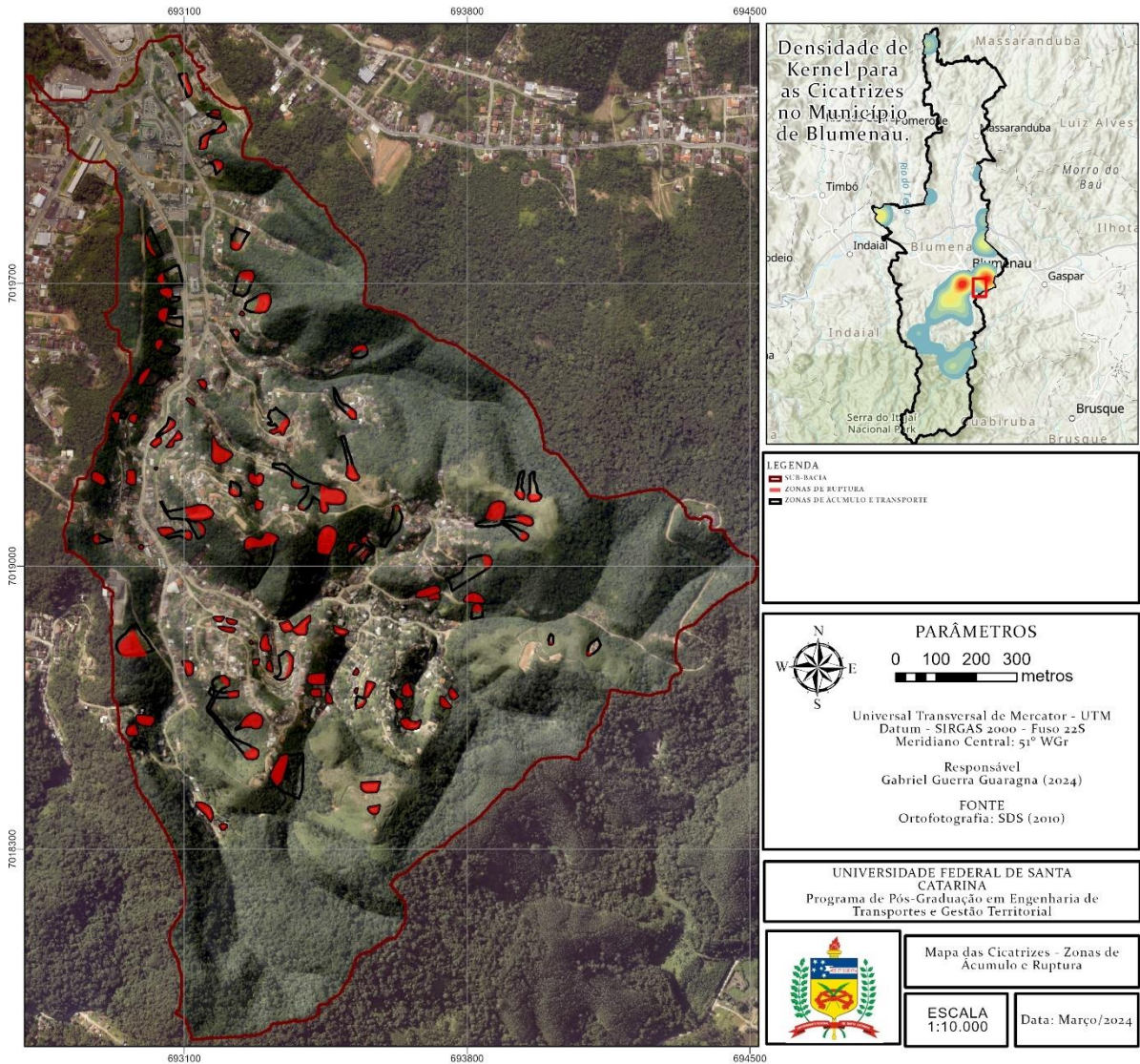
6.5 POTENCIAIS CONDICIONANTES E SUAS RELAÇÕES COM MGM'S

Das cicatrizes referentes à base de dados da Defesa Civil de Blumenau, foram selecionados os MGM que não aconteceram puramente em aterros e desconsideradas as movimentações não planares e translacionais.

Ademais, foi analisada a ortofotografia da SDS (2010), com resolução espacial de 0,39m bem como o próprio mapa base presente no ArcGis. Destes foram delineadas outros MGM que não constavam no *dataset* da Defesa Civil, resultando em 99 MGM's.

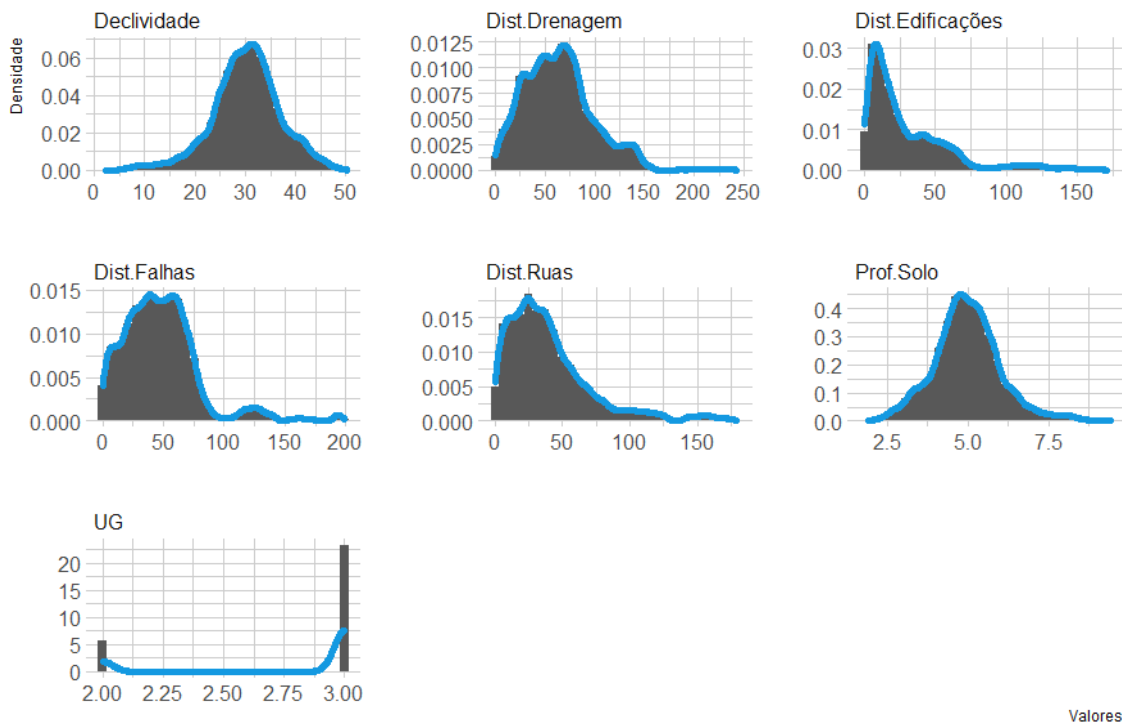
A Figura 45 apresenta os MGM separados em zonas de ruptura, de acúmulo e transporte, o critério utilizado para a execução desta separação foi a declividade. Onde houveram abruptas mudanças de declividade no interior das cicatrizes foi considerado que denotaria o fim da zona de ruptura e início do transporte e posterior acúmulo. Sendo assim, nesta interface de mudança as cicatrizes foram divididas em duas partes, a ruptura e o transporte em conjunto com o acúmulo.

Figura 45: Divisão das cicatrizes e representação das zonas de ruptura



O SHALSTAB utiliza algumas variáveis para predizer as áreas instáveis em determinado terreno, entretanto, muitas outras podem contribuir para o acontecimento de um MGM. A Figura 46, resume algumas condicionantes que podem exercer influência para o rompimento das encostas, e as correlaciona com as zonas de ruptura expostas na Figura 45.

Figura 46: Histograma e densidade de algumas variáveis possivelmente condicionantes



Os gráficos de distância apresentados (Dist) na Figura 46 foram construídos a partir do algoritmo distância euclidiana, presente no ArcGis. O algoritmo calcula a distância, em linha reta, entre dois pontos próximos entre si, neste caso, em metros.

As ruas foram vetorizadas a partir da ortofotografia da SDS (2010), os lineamentos foram delineados a partir do relevo sombreado, construído a partir do MDT, e a rede de drenagem foi extraída a partir do mapa de área de contribuição.

Primeiramente, é possível notar pela figura uma forte influência antrópica nos movimentos gravitacionais de massa da sub-bacia do ribeirão Araranguá. Esta constatação se deve à relação entre as distâncias das ruas e edificações e as áreas de ruptura. Guaragna, Higashi e Viek (2022) observam que as ruas são influências antropogênicas na estabilidade natural das encostas. Cortes de estradas retiram a massa estabilizante nos sopés das encostas e, quando construídas nas elevações das encostas, alteram a sua geometria podendo causar instabilidades.

As edificações geram problemas semelhantes as ruas, quando construídas em locais pouco propícios a urbanização. Algumas influências podem ser o sobrepeso na encosta, a disposição das calhas, canalizando a água e a despejando de forma concentrada em um único ponto, a execução de cortes de aterro sem supervisão e estudo adequado, a disposição do esgoto de forma concentrada na encosta ou a disposição de lixo das residências no sopé das

encostas, podendo gerar bloqueios no escoamento d'água, saturando o solo e reduzindo sua estabilidade. Outros fatores e uma revisão da problemática “taludes urbanos” podem ser encontradas em Brum e Antunes (2018) e Girão *et al.* (2007).

A hidrologia parece influenciar de forma agressiva na estabilidade das encostas na sub-bacia, nota-se que 33,7% das áreas de ruptura encontram-se a menos de 10m de uma rede de drenagem e 88,3% a menos de 40m. De acordo com Wang *et al.* (2016), as redes de drenagem agem saturando o solo e erodindo a base das encostas, gerando instabilidades. Para Silveira (2016) as drenagens atuam no aumento das poropressões, fazendo com que o estado de tensões efetivas do solo se aproxime das condições de ruptura.

Outro potencial impacto da relação espacial das cicatrizes com as redes de drenagem é a possibilidade de transformação de um movimento específico em uma corrida, fato este que ocorreu diversas vezes na sub-bacia e pode ocorrer novamente. Este tipo de movimento é altamente destrutivo, perigoso e pode viajar grandes distâncias.

Os lineamentos, por sua vez, são estruturas de deformação das rochas onde há o deslocamento, especialmente em áreas declivosas, de massas de rochas ou solos (GUARAGNA *et al.*, 2022).

As unidades geotécnicas, declividade e profundidade do solo fazem parte do equacionamento do SHALSTAB. As UG's representam a resistência geomecânica dos materiais, onde pode-se notar que a unidade PVa,s (2) influencia menos nas movimentações, enquanto que a unidade Ca,s (3) domina a instabilidade na área de estudo.

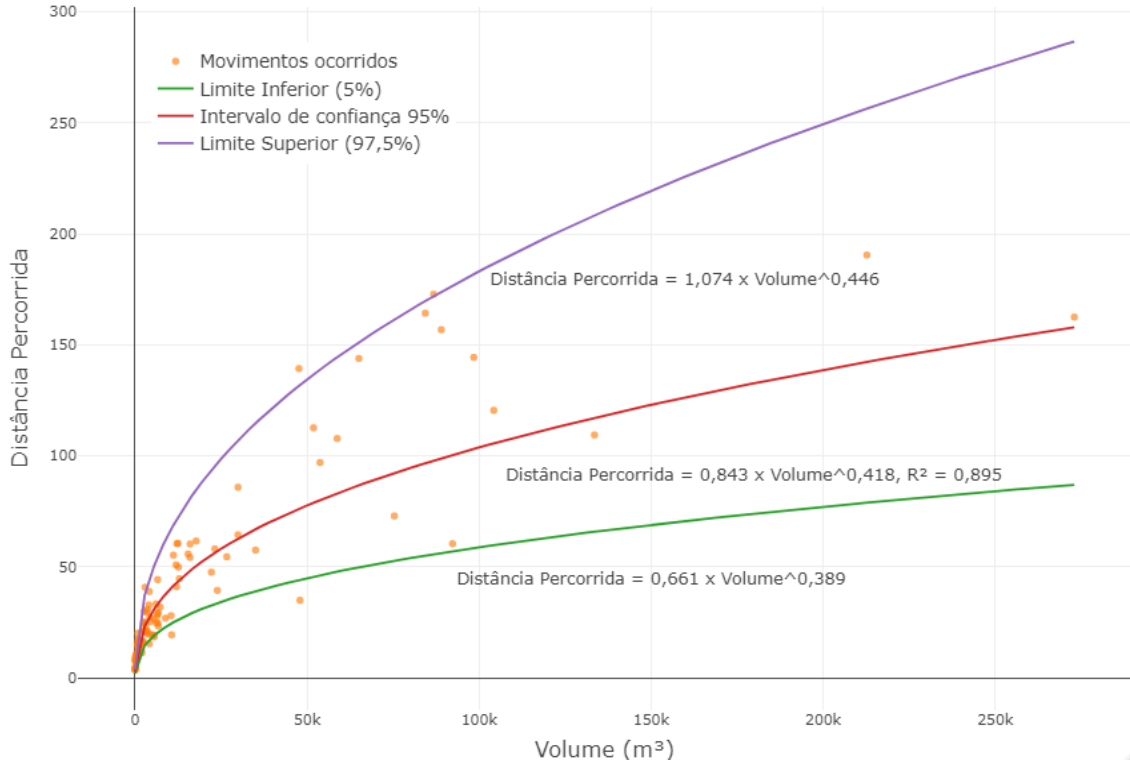
A declividade age a favor da gravidade, isto significa que quanto maior a declividade, maior será a força gravitacional agindo sobre o material e, portanto, aumentam-se as forças cisalhantes no sistema. Declividades superiores a 25° representam a maior parte dos movimentos encontrados na sub-bacia, enquanto que declividades abaixo dos 25° não representam grandes problemáticas nos movimentos deflagrados.

Quanto à profundidade dos solos, pode-se notar novamente a concordância com o exposto no relatório técnico de Blumenau (2010), onde as cicatrizes estariam próximas a perfis de solo com aproximadamente 5m de espessura.

Ademais, as cicatrizes guardam relações geométricas que podem elucidar algumas características das movimentações na área de estudo. A Figura 47 apresenta relações entre o volume de solo mobilizado e as distâncias percorridas pelas movimentações. Tanto o volume quanto a distância percorrida foram estimados através das cicatrizes. A partir destes valores foram modeladas funções potência considerando o intervalo de confiança 95%, onde os

limites superiores e inferiores, os quais englobam praticamente todas as movimentações, também foram plotados.

Figura 47: Relação volume x distância percorrida (em metros).



Movimentações de pequenas dimensões, mais comuns na área, tendem a mobilizar pouco material e raramente evoluem para corridas de detrito. A vasta maioria das movimentações percorrem distâncias inferiores a 75m e apresentam volumes mobilizados inferiores a 50.000m³.

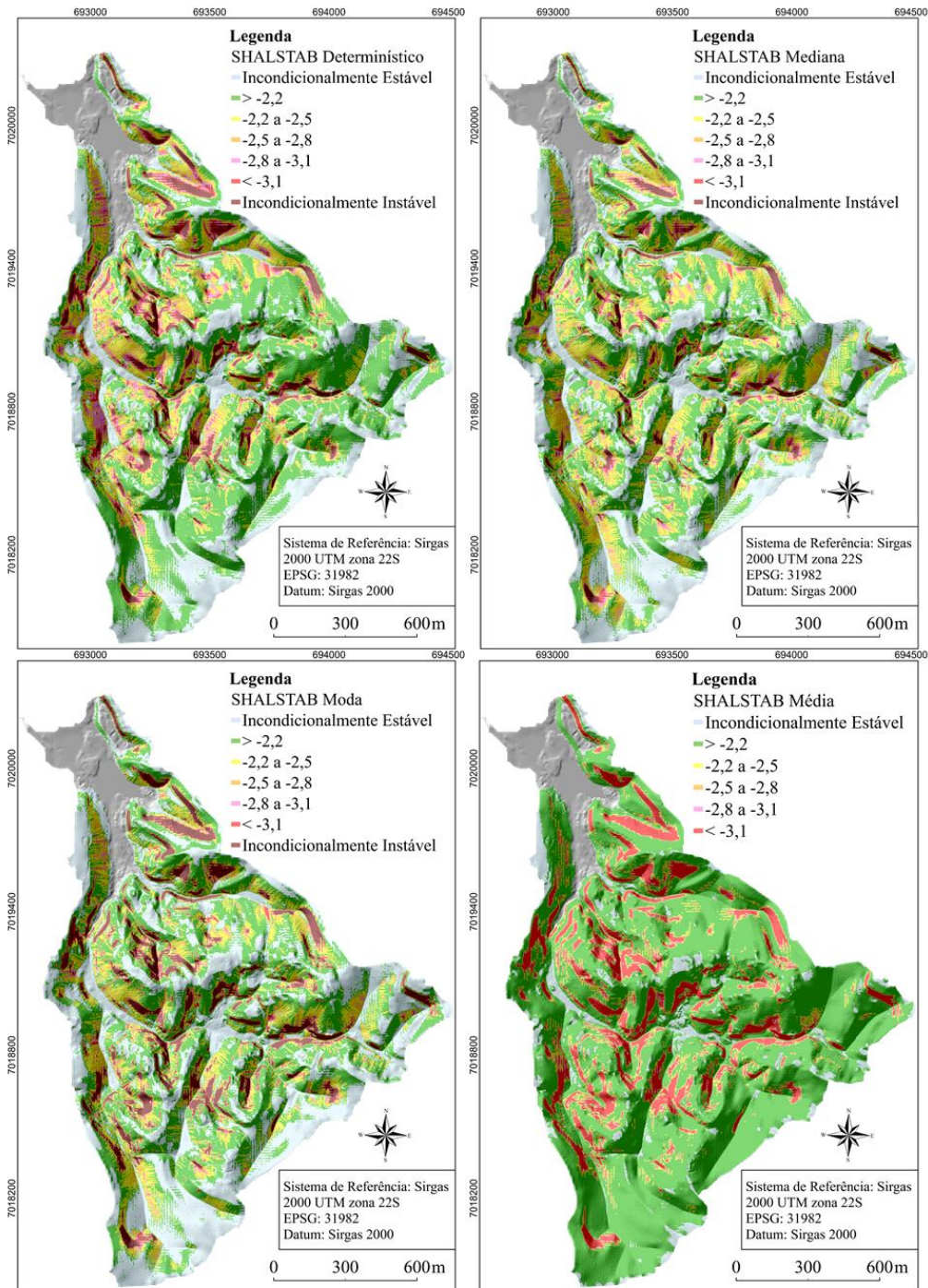
6.6 MAPAS - BANCO DE DADOS.

Nesta sessão serão apresentados os mapas gerados através de dados da literatura. Com o fim comparativo aos dados reais de campo, procura-se entender o quanto o método é capaz de ultrapassar incertezas envolvidas com esses dados, possibilitando eventuais mapeamentos sem que sejam necessárias campanhas de campo.

6.6.1 Mapas Determinístico e Estatísticos (BD)

Na Figura 48 são apresentados os mapas estatísticos e determinístico do SHALSTAB, todos advindos do BD. Os mapas estatísticos foram gerados após 100.000 simulações Monte Carlo, portanto, tendem a representar de forma correta a distribuição estatística do modelo.

Figura 48: Mapas determinístico e estatísticos SHALSTAB - BD.



De acordo com Dietrich et al. (2001) a eficiência do modelo SHALSTAB se dá por ser capaz de classificar como instáveis locais onde houveram MGM e, além disto, classificar como instável apenas uma pequena porção da área de estudo como um todo.

De acordo com a Tabela 5, três classes podem ser interpretadas como estáveis e quatro como instáveis. O relacionamento entre os possíveis limiares com o exposto por Dietrich et al. (2001), pode determinar o cenário ideal no quesito habilidade do modelo

SHALSTAB em classificar como instável apenas uma pequena área do todo presente na área de estudo.

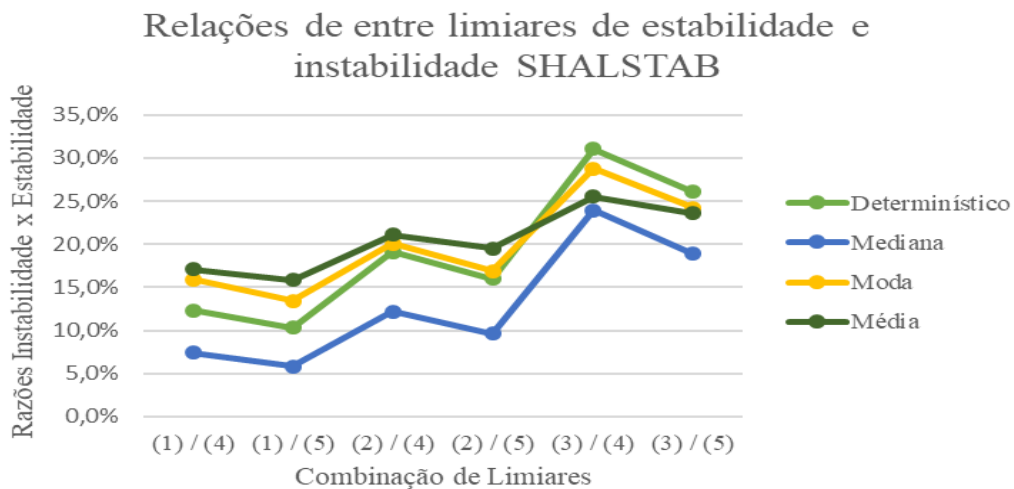
Com o fim de averiguar tal pressuposto foram definidos diferentes limiares de estabilidade e de instabilidade. A Tabela 17 apresenta as relações entre as áreas instáveis e estáveis perante a área de estudos como um todo.

Tabela 17: Possíveis limiares de instabilidade e estabilidade.

Limiares	Determinístico	Instável		
		Média	Moda	Mediana
1) < -3,1	8,2 %	12,8 %	10,8 %	4,9 %
2) < -2,8	12,7 %	15,8 %	13,6 %	8,1 %
3) < -2,5	20,7%	19,1 %	19,5 %	15,9 %
		Estável		
4) > -2,2	66,6 %	74,9 %	67,8 %	66,4 %
5) > -2,5	79,3 %	80,9 %	80,5%	84,1 %

Portanto, a partir da tabela apresentada busca-se pela menor razão entre áreas instáveis e estáveis. Percebe-se que, considerando o limiar de instabilidade, valores < -3,1 (1) e estabilidade, valores > -2,5 (5), resultaria na menor relação de classificação de áreas instáveis em relação ao todo. O gráfico presente na Figura 49 relaciona os diferentes limiares possíveis presentes na Tabela 17.

Figura 49: Relação entre limiares de instabilidade e estabilidade



O mapeamento considerando a mediana foi o que resultou na menor relação e melhor comportamento entre instabilidade e estabilidade, seguido pelo mapeamento determinístico, a moda e a média. Neste sentido, a média não parece ser uma boa opção para avaliar a estabilidade das encostas considerando o SHALSTAB.

Um ponto a ser mencionado é a forma de apresentação dos resultados do SHALSTAB, as classes extremas (incondicionalmente estáveis e instáveis) não advêm da Equação (34) e, por esta razão, não têm um valor atrelado específico. Este fato torna o peso das classes $< -3,1$ e $> -2,2$ (que em teoria podem ir ao infinito, embora em todos os testes não tenham excedido os valores ± 10) maior do que os extremos incondicionais. Por este motivo, o mapa médio não mostrou nenhuma área incondicionalmente instável, mesmo após 100.000 simulações.

A validação e acurácia dos modelos será apresentada em capítulo subsequente.

6.6.2 Mapa Probabilístico (BD)

Para a construção do mapa probabilístico, em cada época de simulação todos os pixels das matrizes passaram por uma função de ativação. Para o caso do BD foi assumido o cenário em que não há disponibilidade de quaisquer dados da área e, portanto, a função de Boltzmann foi escolhida arbitrariamente para a padronização das saídas dos valores SHALSTAB (Figura 50).

A função desenvolvida por Boltzmann em 1872 é uma função sigmóide que cresce lentamente em seu início, rapidamente e quase linearmente em seu meio, estabilizando com altos pesos (ou probabilidades) em seu final, formando uma espécie de “s”. Serão atribuídas às células do mapa SHALSTAB o peso máximo de 1, representadas pela classe incondicionalmente instável. Todas as demais células passarão pela função de Boltzmann e receberão um peso específico diferente em cada simulação. Quanto mais negativo for o valor, menor a quantidade de chuva necessária para saturar o solo e maior será o seu peso para o possível desencadeamento de um MGM.

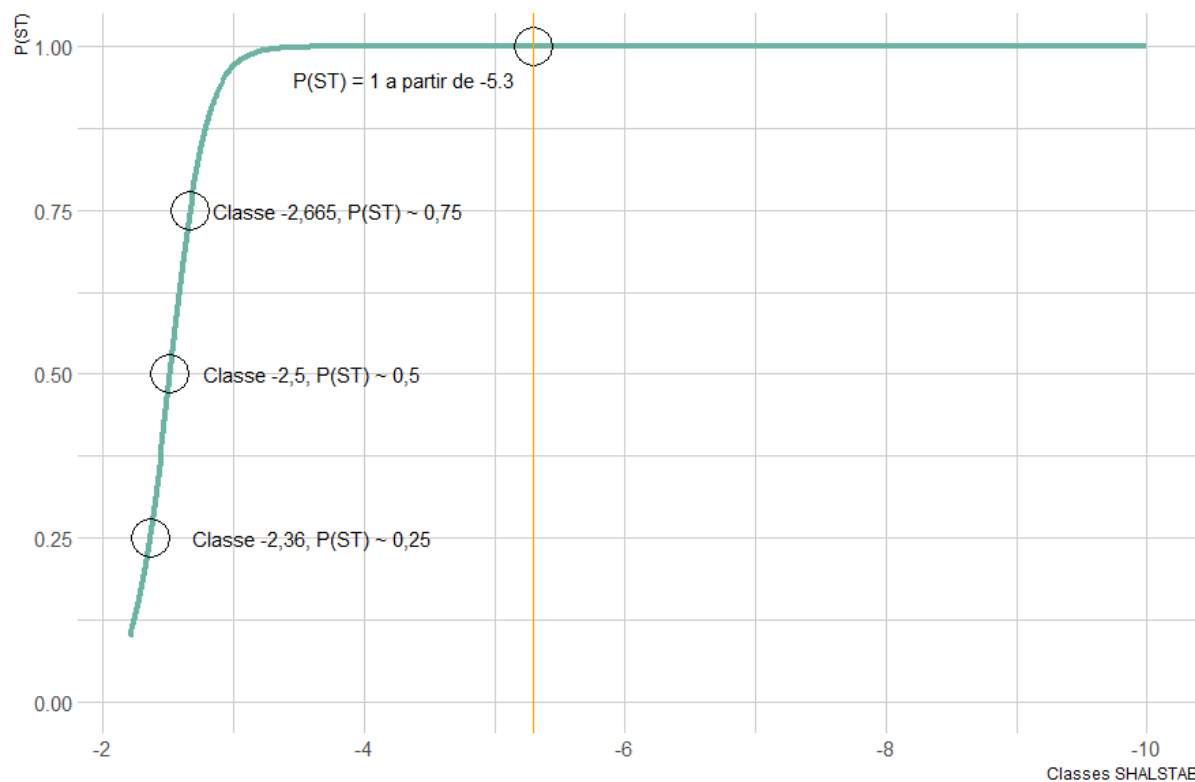
A função de é construída a partir da Equação (35) e indicará probabilidades para cada valor SHALSTAB (Figura 50).

$$P_{(st)} = \frac{1}{1 + e^{\frac{a-st}{b}}} \quad (35)$$

Onde $P_{(st)}$ é o peso dado pela função a determinado valor SHALSTAB; a é o valor médio; b é a declividade da curva; e st é o saída do SHALSTAB.

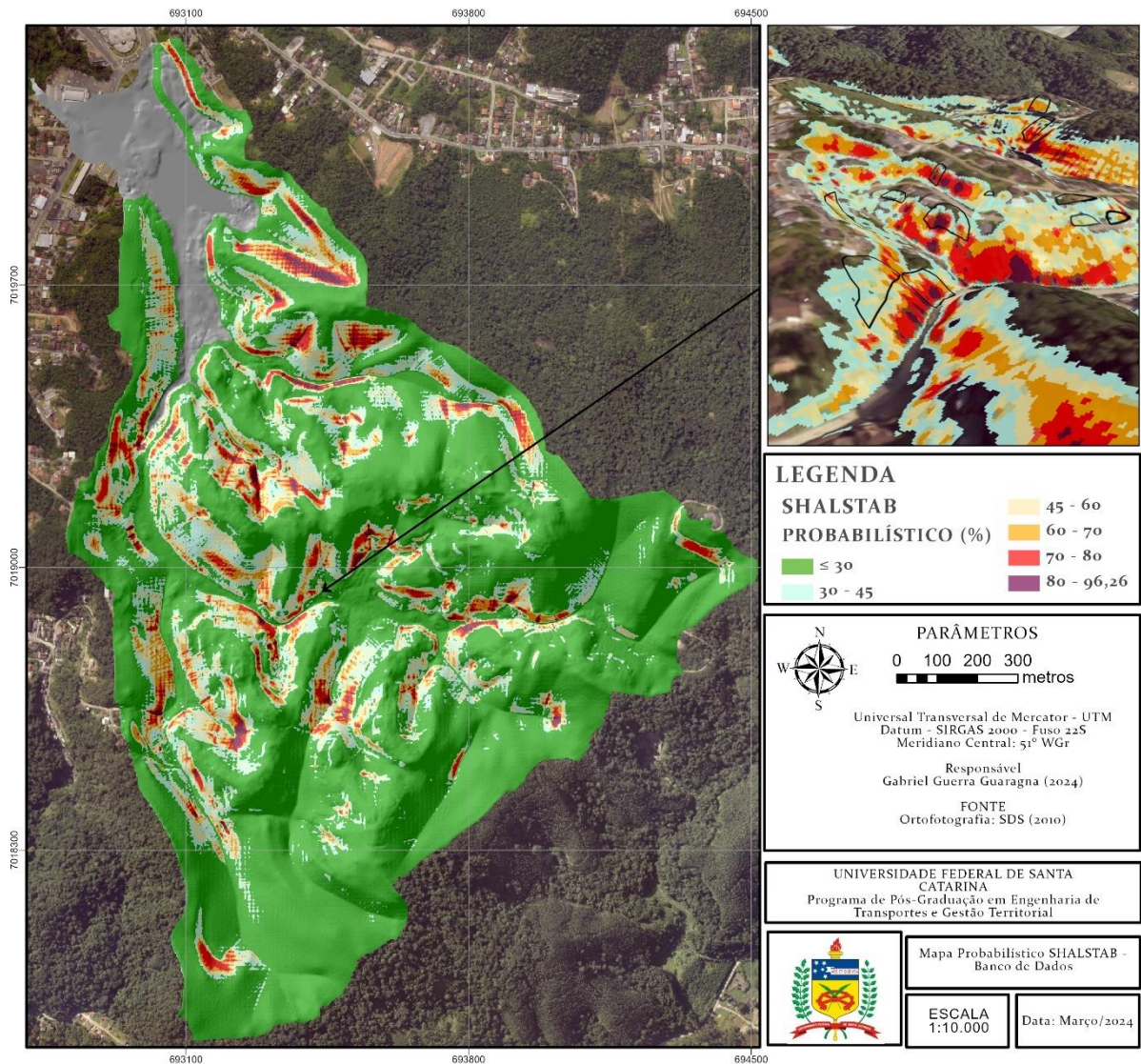
As constantes a e b permitem modelar a curva, possibilitando testar diferentes pesos para os valores SHALSTAB. Assim, a validação dos pesos se deu em respeito à correspondência de um bom resultado do mapa probabilístico final às cicatrizes.

Figura 50: Função de Boltzmann das classes SHALSTAB



O mapeamento probabilístico do SHALSTAB (Figura 51) foi executado em 100.000 simulações, utilizando as saídas padronizadas ($P_{(st)}$) e variando os parâmetros de acordo com as PDF's apresentadas.

Figura 51: Mapa probabilístico SHALSTAB (BD)



A partir do mapa apresentado, pode-se notar a relação de risco existente na área de estudo. Ressalta-se que não houve um estudo direcionado para esta problemática, algo que terá que ser averiguado futuramente, correlacionando vulnerabilidade e outros parâmetros socioeconômicos ao mapeamento probabilístico.

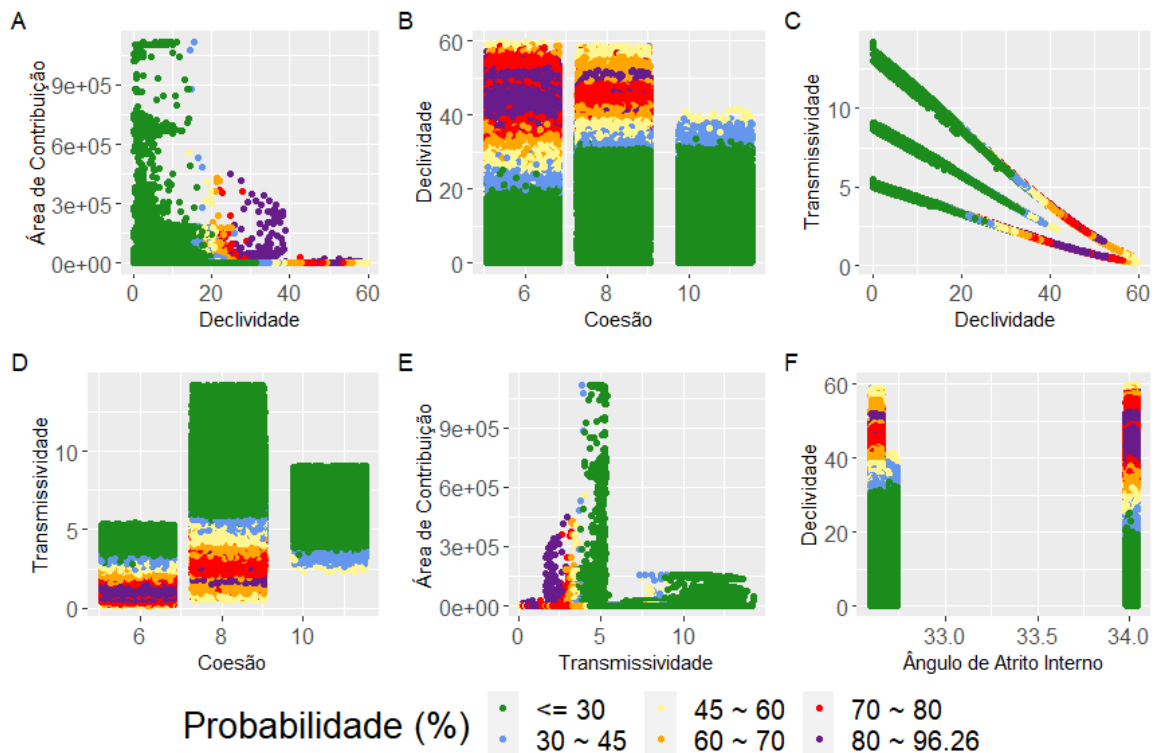
Um fator importante a ser mencionado é a variabilidade dos parâmetros do solo. Continuamente no espaço e no tempo, estes parâmetros mudam. Eventos como a chuva pode reduzir a coesão de um solo ou aumentar o peso específico da massa do solo, consequentemente diminuindo a resistência ao cisalhamento e aumentando as forças de cisalhamento, respectivamente. Em qualquer ponto de um terreno há infinitas combinações de parâmetros, informações estas que na prática não são possíveis de se capturar com os métodos de teste atuais. Assim, mesmo generalizando em áreas polígonos com comportamento

geomecânico semelhante, utilizando apenas dados adquiridos da literatura, em várias simulações é possível aproximar a tendência real na natureza.

Com o fim de analisar a resposta do modelo probabilístico aos parâmetros nele utilizados, foram construídos gráficos de dispersão relacionando algumas variáveis importantes na definição da instabilidade com as probabilidades (Figura 52).

Não serão apresentados os gráficos relacionando a profundidade do solo com as variáveis. A razão disto se dá, pois, as suas respostas são muito próximas do contrário ao observado nos gráficos relacionando a declividade com as variáveis. O maior controle da profundidade do solo se dá pela declividade, além do TWI que é função também da declividade e da área de contribuição.

Figura 52: Relações entre variáveis predictoras e probabilidades.



Percebe-se que de fato coesões e transmissividades baixas (D) tendem a aumentar a probabilidade de ruptura das encostas. Quanto à coesão, o sentido está na aderência entre as partículas, quanto menor a coesão, menor a aderência e, portanto, pequenos distúrbios como o aumento da quantidade de água retida no solo podem gerar uma ruptura. A transmissividade correlaciona-se ao mencionado, se o solo não tem capacidade de drenar a água de um evento pluviométrico, a tendência é a diminuição da coesão e aumento do peso específico da massa de solo, aumentando assim a probabilidade de ruptura da encosta.

Quanto à declividade, a tendência observada é de que quanto maior o ângulo da encosta, maior a probabilidade de ruptura. Quanto maior o ângulo, maior a ação da gravidade e dos materiais sobrepostos a um ponto específico da encosta, isto somado a uma coesão baixa (B) ou a incapacidade do solo em drenar a água (C) faz aumentar significativamente as chances de uma encosta romper.

O gráfico relacionando a área de contribuição (ab) e a declividade (A) mostra uma relação não esperada. Valores baixos do ab tenderam a probabilidades mais elevadas, isto se deve pela geomorfologia do terreno em estudo. A área é formada por vales em “v” fechados, de relevo montanhoso, o significado disto é de que as áreas com respostas do ab mais elevadas estão concentradas nos vales, onde os cursos d’água irão se concentrar. Pelo motivo da área de estudo ser altamente declivosa não há uma expressão elevada desta variável nas encostas e, portanto, sua resposta para com as probabilidades foi baixa.

A relação entre a transmissividade e a área de contribuição (E) ajuda a corroborar o mencionado, a baixa capacidade do solo em drenar a água e valores baixos de ab dominam as probabilidades altas de ruptura nas encostas. Solos com transmissividades acima de 5 m/d tendem a apresentar probabilidades abaixo dos 50% de probabilidade de rompimento das encostas.

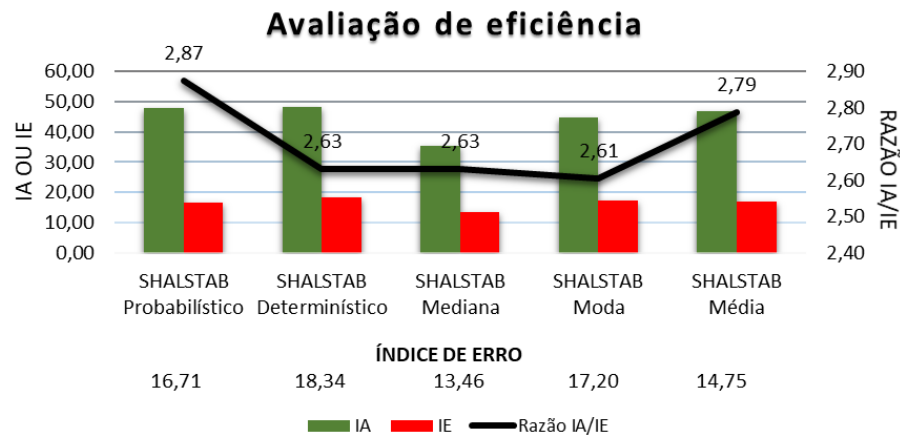
Por fim, a relação entre a declividade e o ângulo de atrito interno (F) demonstrou que ângulos de atrito interno mais elevados tendem a maior contribuição na instabilidade das encostas, provavelmente por que nestes locais os outros parâmetros que tendem à instabilização são mais proeminentes. Para evitar demasiados gráficos, foi selecionado apenas esta relação para demonstrar tal constatação. Pode-se pensar que quanto menor a coesão e maior o ângulo de atrito, maior a probabilidade de ruptura.

6.6.3 Validação dos mapas: Banco de dados

Três métodos de validação foram utilizados com o fim de inferir sobre a eficácia dos modelos, sendo o ROC/AUC e os índices de acerto e erro comuns a todos os mapeamentos e a Entropia Cruzada específica para o mapeamento probabilístico.

Os índices de acerto e erro de Sorbino et al. (2007) indicam globalmente a porcentagem de acerto e de erro das previsões em relação aos polígonos de cicatrizes. Os índices foram calculados e arranjados em um gráfico para melhor visualização, apresentado na Figura 53.

Figura 53: Índices de acerto e erro dos mapas BD



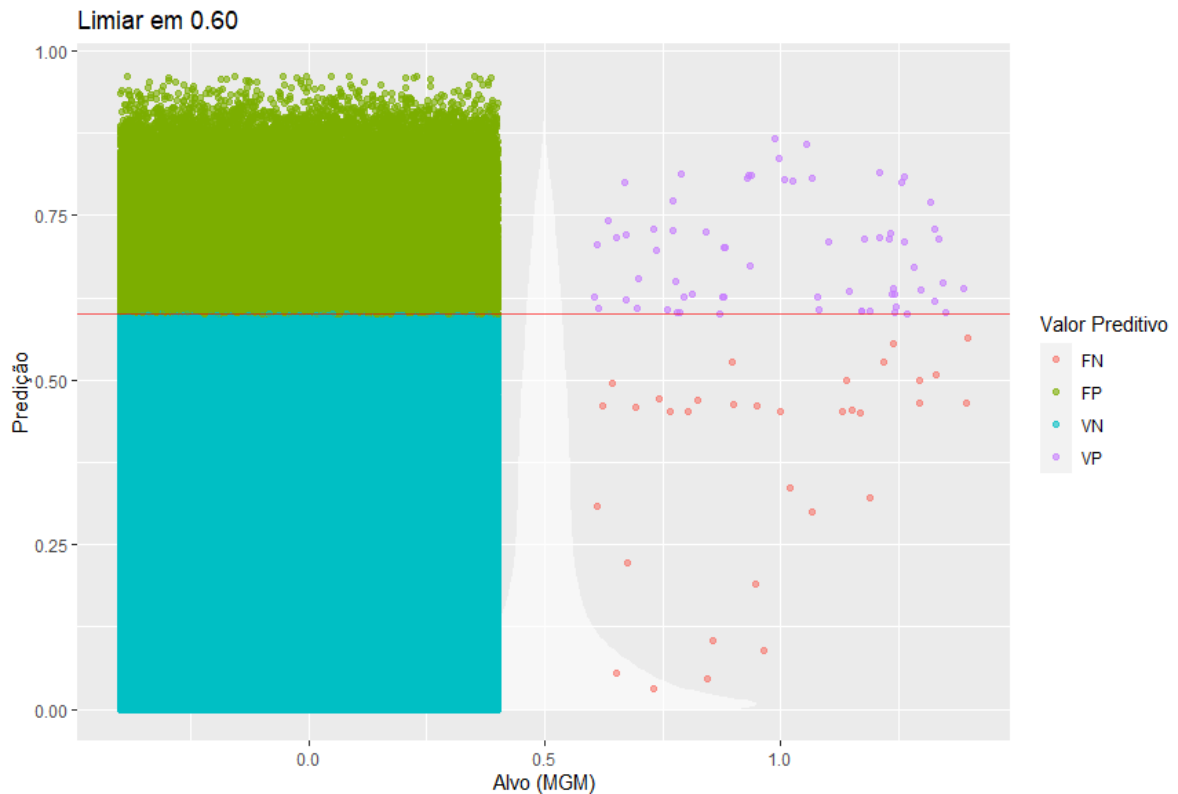
O relacionamento entre o mapeamento e as cicatrizes é feito através das áreas das zonas de ruptura das cicatrizes, considerando todos os pixels ali presentes. O único ponto a ser observado é que não necessariamente toda a área de uma cicatriz é instável antes que a falha ocorra. Uma pequena ruptura pode acabar por mobilizar um volume muito maior de material, mas que não era necessariamente instável antes deste primeiro movimento.

Todavia, em conjunto com outros métodos de validação esta informação pode ser bastante útil. As relações feitas são da porcentagem de vezes em que se classifica uma dada área como instável e, de fato, trata-se de uma área instável (IA). A outra define a superestimação do modelo, ou seja, o quanto será classificando como instável onde não há evidências de instabilidade (IE).

Portanto, pode-se constatar o melhor desempenho do modelo probabilístico em comparação com os outros, o modelo foi capaz de prever 48,01% das áreas instáveis coincidindo com as cicatrizes, enquanto superestimou apenas 16,71%. O modelo determinístico, por outro lado, apesar de apresentar uma porcentagem maior de concordância com as cicatrizes (48,24%), também apresentou uma superestimação maior (18,34%). Estes números, embora não pareçam ser muito diferentes, podem acabar representando despesas desnecessárias em uma possível intervenção futura.

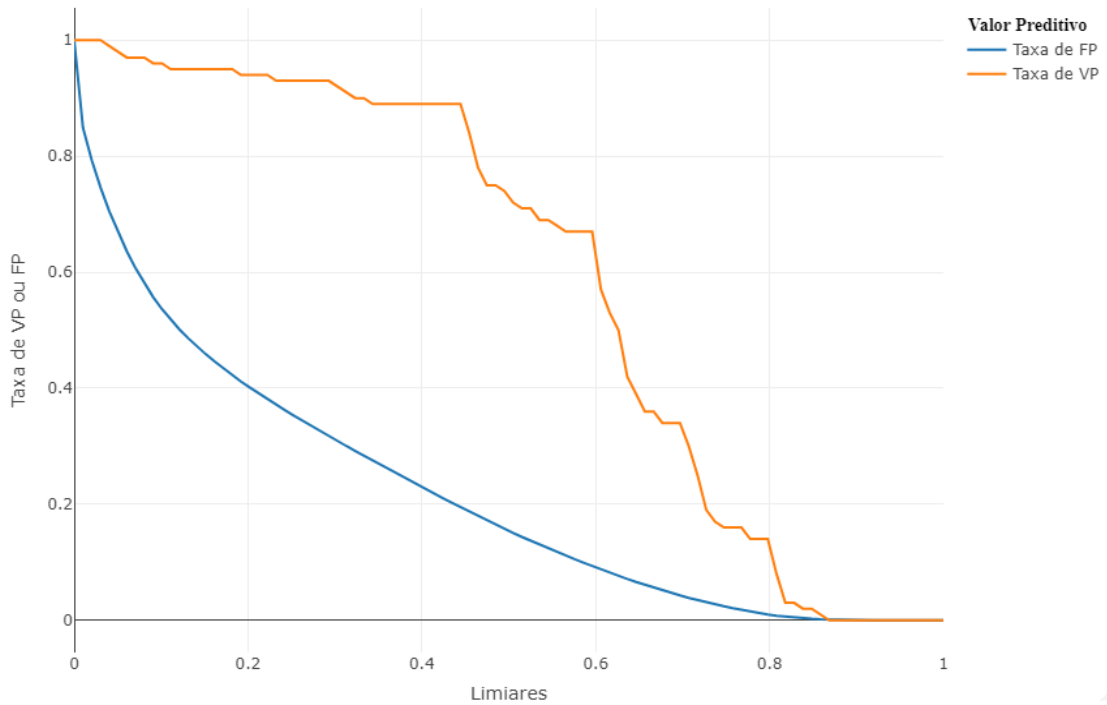
Quanto ao mencionado por Dietrich et al. (2001), assim como feito para os mapas determinísticos, foi necessário definir um limiar ótimo para o modelo probabilístico. Para tal, foram relacionados os pixels do mapa probabilístico com os centroides de ruptura, de onde foi possível aferir quanto às estatísticas Verdadeiro Positivo (VP), Falso Positivo (FP), Verdadeiro Negativo (VN) e Falso Negativo (FN). Destas estatísticas foi construído o gráfico apresentado na Figura 54.

Figura 54: Definição do limiar de instabilidade



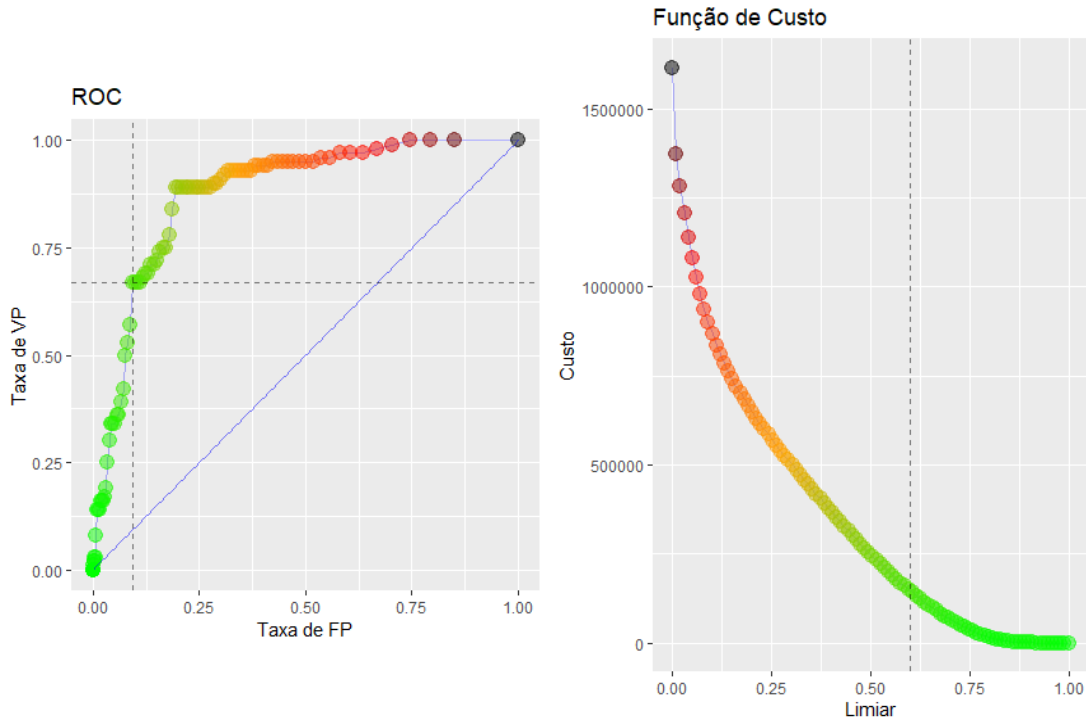
Considerando que nos locais onde houve um MGM o valor atribuído é 1 e nos locais onde não há MGM o valor atribuído é 0, o que se busca é reduzir os valores FN e FP de modo que se tenha a maior relação de taxa de acerto na predição, tanto para áreas estáveis quanto instáveis. Dessa forma, o limiar de 0,6 para instabilidade no mapa probabilístico faz com que se tenha muitos VN, uma quantia aceitável de VP e, portanto, reduzindo os valores negativos de FP e FN. A Figura 55 demonstra em um gráfico a variação da Taxa de FP (1 - Especificidade) e Taxa de VP (Sensitividade) em relação aos possíveis limiares, permitindo uma visualização diferente da apresentada anteriormente. Verifica-se que ao adotar o limiar de 0,6 a sensibilidade do modelo é alta, ao passo que a Taxa de FP é bastante baixa.

Figura 55: Taxa de FP e VP em relação aos diferentes limiares



Definido o limiar ótimo faz-se importante analisar a eficácia do modelo. Para tanto, valeu-se da curva ROC e o valor respectivo AUC. Todavia, há atrelado à curva ROC um custo associado em relação aos valores negativos. Em se tratando de estabilidade de encostas, especialmente na gestão de áreas de risco, sempre há a preocupação quanto ao *trade-off* (na tradução literal: “perde-ganha”). Dependendo do caso de uso, os FN podem ser mais perigosos do que os FP ou vice-versa. Isso significa que ao gerar um mapeamento, tem-se que definir o quanto é razoável classificar a mais ou a menos as áreas instáveis no modelo. Na Figura 56 está apresentado o gráfico ROC bem como a função de custo associada ao modelo probabilístico BD, onde foi considerado que a taxa de FN é 10 vezes mais perigosa que os FP. A função de custo e a cor correspondente dos pontos ROC ilustram que uma combinação ideal de Taxa de FP (1 - Especificidade) e Taxa de VP (Sensitividade) é determinada pelo custo associado.

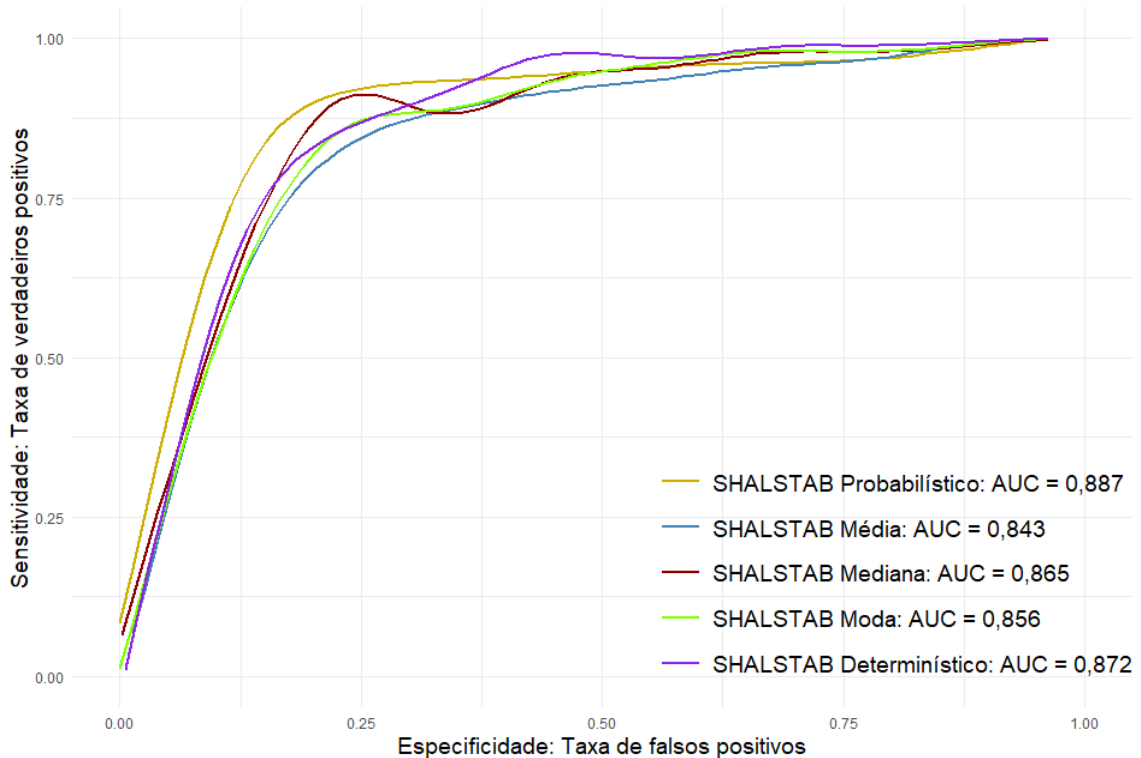
Figura 56: Curva ROC e função de custo associada



As linhas tracejadas indicam os locais (Taxa de FP e Taxa de VP) correspondendo ao limiar de 0,6. Considerando tal limiar tem-se como resultado um mapeamento com 57% de taxa de VP, 8,76% de taxa de FP e um custo de 142.039. Se considerado o limiar em 0,5, a taxa de VP passa a ser 72%, a taxa de FP passa a ser 15,1% e o custo associado praticamente dobra, 243.271. Assim, é possível definir a relação de acerto e erro razoável para o mapeamento

A análise aplicando o método ROC e AUC foi feita através dos centroides das zonas de ruptura, justamente pelo afirmado anteriormente quanto a desestabilização de uma pequena porção do terreno. Na Figura 57 são apresentadas as curvas ROC de todos os modelos, onde foi aplicada uma suavização das linhas para melhor visualização, bem como as AUC associados.

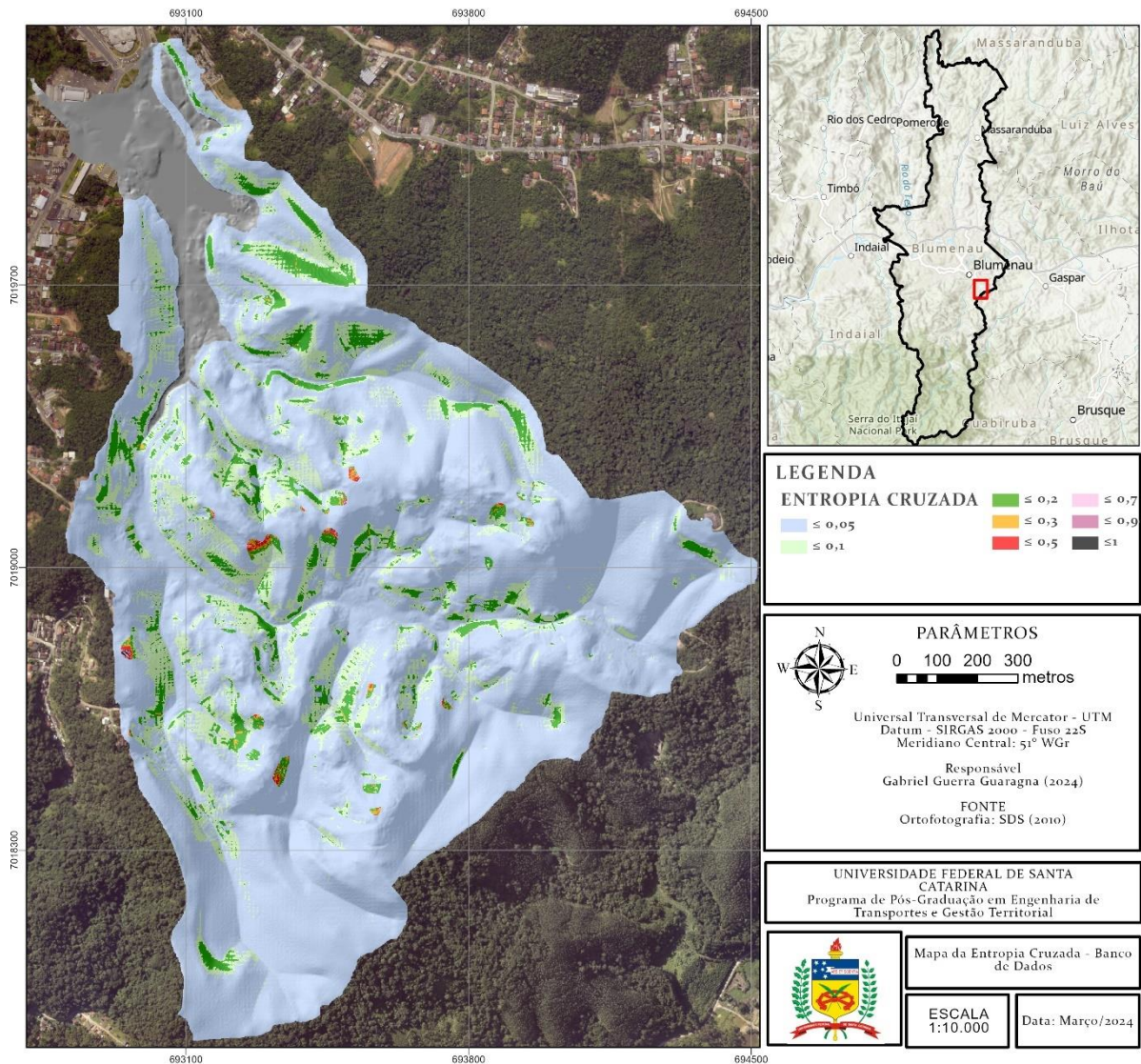
Figura 57: Análise ROC/AUC para os mapas BD



Novamente, o melhor desempenho do modelo probabilístico em comparação com os outros pode ser observado. O pior desempenho foi o mapa médio, algo já observado através da análise dos limiares de estabilidade. O modelo determinístico provou ser eficiente, mas quando comparado ao modelo probabilístico não há dúvida de sua inferioridade. Isto se deve precisamente porque os valores médios de um banco de dados ou de uma série de amostras de campo não representam necessariamente o verdadeiro comportamento médio. A lei dos grandes números tende à média ao mesmo tempo em que infere a probabilidade, a diferença é que ao invés de considerar os valores médios em uma análise determinística, ela acaba passando por várias combinações de parâmetros que irão inferir a probabilidade média. De fato, a estocasticidade traz informações muito mais poderosas do que o determinismo quando se trata de estabilidade de encostas. Não apenas na análise numérica, mas também na confiança subjetiva de um analista ou projetista que precisa desta informação.

Por fim, apresenta-se uma forma pouco convencional de validação para mapas preditivos, a entropia cruzada (Figura 58).

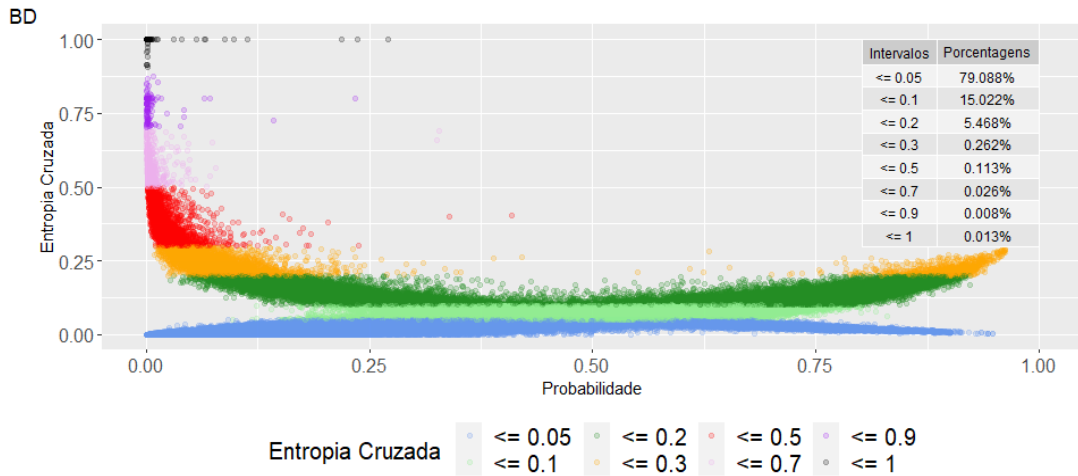
Figura 58: Entropia Cruzada – SHALSTAB probabilístico (BD)



Os valores presentes na legenda representam a distância em que o modelo se encontra da probabilidade real ou efetiva – zonas de ruptura – (Ver capítulo 2.12.2). Por intermédio do mapa pode-se observar erros de pequena magnitude na maior parte da área de estudo e, em algumas cicatrizes, erros mais pronunciados. Nestas cicatrizes, o erro refere-se à classificação do mapeamento como sendo uma área com baixa probabilidade de ruptura, mas há a evidência de ruptura através de uma cicatriz.

Com o intuito de melhor visualizar a informação que este mapa apresenta, foram relacionados pixel a pixel as probabilidades e os erros da entropia cruzada, gerando o gráfico da Figura 59. O relacionamento se dá através de um gráfico de dispersão onde as cores de cada ponto (ou pixel) refletem os erros da legenda da Figura 58.

Figura 59: Relação Entropia Cruzada e Probabilidades (BD)



Tal gráfico permite aferir constatações importantes do método proposto. As áreas classificadas como instáveis e que de fato são instáveis devido à presença de cicatrizes não apresentaram erros demasiadamente elevados, isto pode ser observado ao lado direito da figura. A maior parte dos pixels se manteve com erros inferiores a magnitude 0,2 (99,578%). Percebe-se pelo gráfico que a maior fonte de erros no mapeamento está nas probabilidades baixas, ou seja, o mapeamento classificou como estáveis (ou com baixas probabilidades de rompimento) pixels no interior das cicatrizes. Portanto, o problema não está na superestimação, mas sim na subestimação. Outra forma de se ver o problema é relacionar com a constatação de que não necessariamente toda a área da cicatriz estaria instável no momento da ruptura, mas sim que poucas unidades do terreno instáveis acarretariam na mobilização de um volume maior de material no movimento como um todo.

As três validações demonstram um resultado do modelo probabilístico considerado ótimo. Utilizando-se apenas de dados compilados da literatura, o modelo apresentou pouca superestimação, um alto AUC e erros pouco significativos em relação à distância efetiva da probabilidade real.

6.7 MAPAS – BST

Nesta sessão são apresentados os resultados advindos dos dados de campo. Assim como nos mapas resultantes do BD, são apresentadas as análises de forma análoga para que se possa comparar os resultados.

6.7.1 Determinístico e Estatísticos (BST)

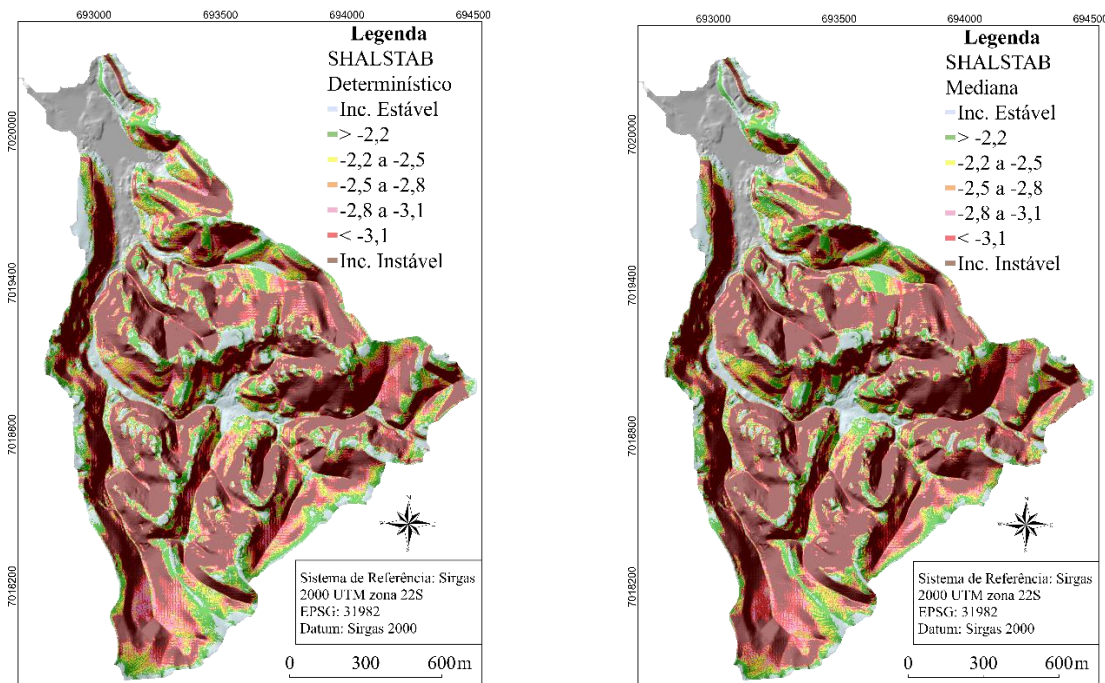
A Figura 60 apresenta os mapas determinístico e estatísticos SHALSTAB. O mapa determinístico foi definido através dos valores médios dos parâmetros de campo enquanto que os estatísticos foram derivados após 100.000 simulações.

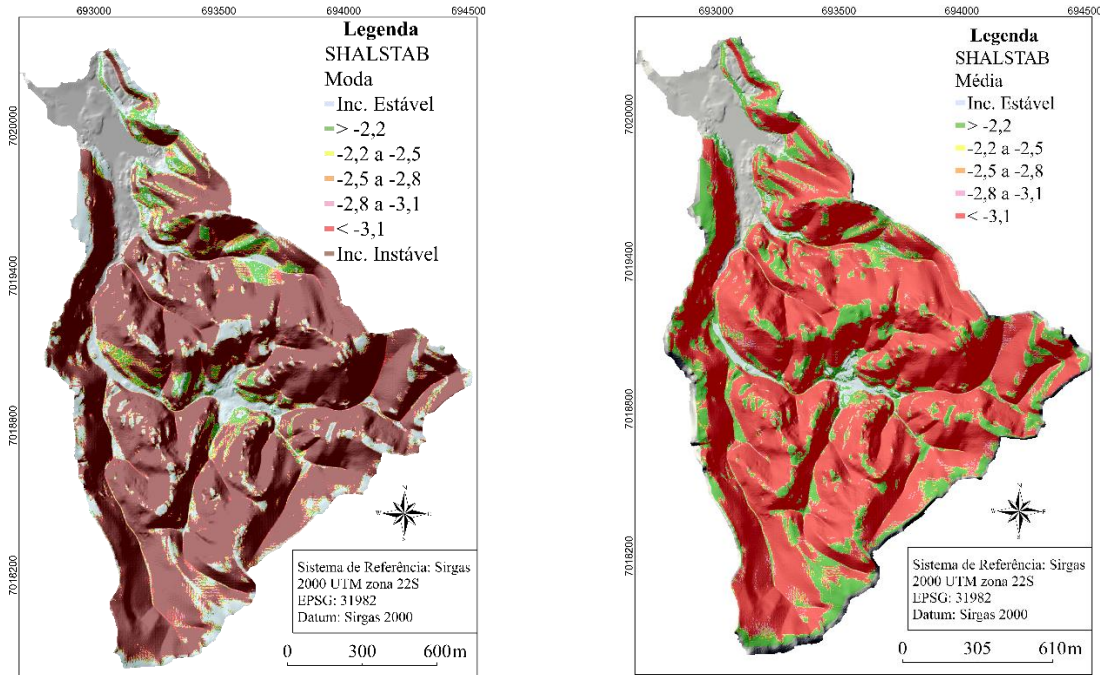
Como já demonstrado, os parâmetros geotécnicos para uma mesma UG variam em grande escala. A versão BD do mapeamento em comparação com a versão apresentada na Figura 60 subestima de forma generalizada a estabilidade das encostas na área de estudo.

Observa-se que tanto o mapa determinístico quanto os mapas estatísticos discretos conferem uma instabilidade generalizada na área. De fato, os parâmetros são tão baixos que os mapas apresentados praticamente não trazem informações suficientes para que se possa fazer alguma setorização de risco ou tomada de decisão.

Este fato, mesmo para os mapas estatísticos, tem a ver com a questão determinística. Por mais que se variem os parâmetros de resistência para a definição dos mapas estatísticos, os mapas por si só ainda são discretos e separados em classes, classes estas que não necessariamente representam o verdadeiro comportamento da estabilidade.

Figura 60: Mapas determinístico e estatísticos SHALSTAB - BST.





Como ressaltado, a eficiência do modelo SHALSTAB se dá por ser capaz de classificar como instável apenas uma pequena porção do todo na área de estudo, algo que não ocorreu neste mapeamento. Pode ser afirmado que a eficiência dos mapas determinísticos e estatísticos BST estão aquém do esperado pois não foram capazes de setorizar áreas distintas.

Não está sendo dito que os mapeamentos estão incorretos, de fato a área da sub-bacia é altamente instável, é considerada uma área de risco no município e é uma das áreas proporcionalmente mais afetadas por movimentações gravitacionais de massa em Blumenau.

De acordo com 2 dos 4 mapeamentos, sequer é necessário o efeito da hidrologia para que a instabilidade ocorra, visto que a classe incondicional instável afirma que as relações dos parâmetros de resistência ao cisalhamento não são suficientes para compensar os efeitos da declividade. De acordo com apenas estes mapeamentos, a área como um todo deveria ser desocupada.

6.7.2 Probabilístico (BST)

O modelo probabilístico BST, assim como o modelo BD, necessitou da determinação de uma função de ativação.

Neste caso, propôs-se que sejam usados o máximo possível de dados reais da área de estudo, isto foi também adaptado para a função de ativação.

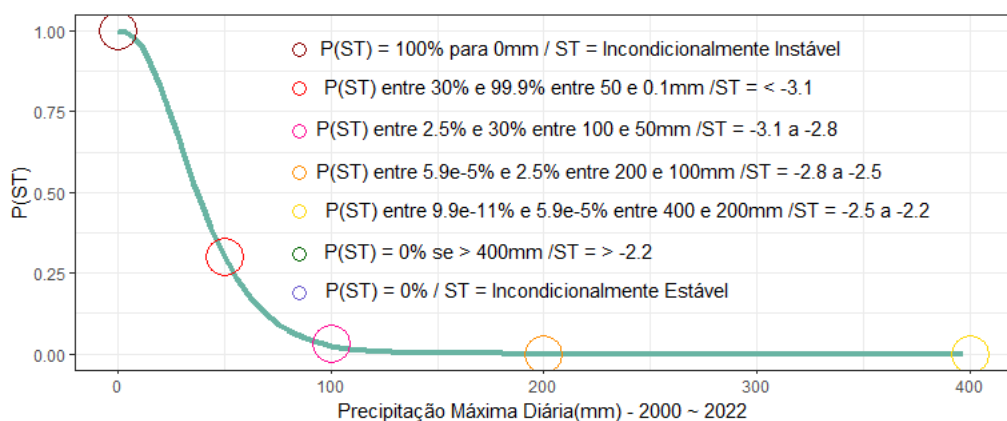
Como mencionado no método, o SHALSTAB indica a quantidade de precipitação necessária para saturar o solo e causar a ruptura da encosta, o que depende também da capacidade do solo de drenar a água para fora do sistema (transmissividade).

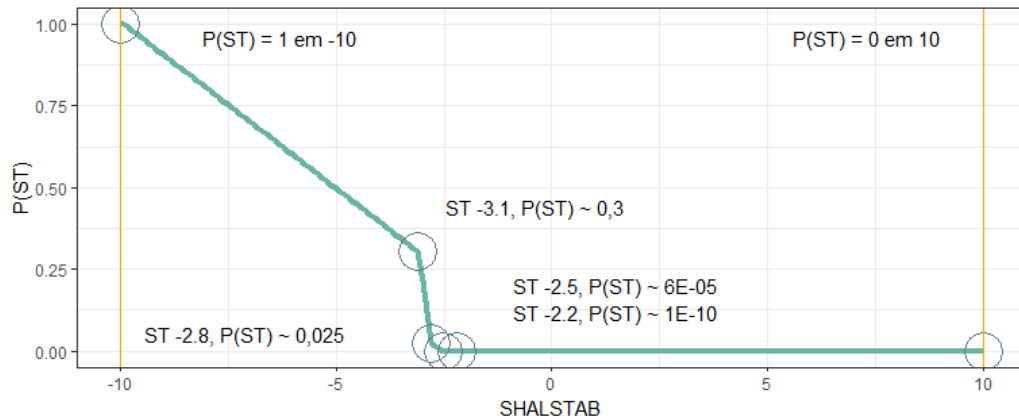
As classes SHALSTAB são relacionadas com quantidades de precipitação necessárias para instabilizar uma encosta (Tabela 5), pode-se utilizar séries históricas de precipitação para uma dada área de estudo com o fim de se definir os limiares SHALSTAB de uma forma mais precisa. Para tanto, foi definida a função CDF gamma inversa da precipitação máxima ocorrida em um único dia, para cada mês, no período compreendido entre os anos de 2000 a 2022 (fonte: Agência Nacional de Águas, 2022). Ambas as funções CDF e gamma foram comentadas no capítulo Variáveis Aleatórias.

A inversão da CDF se deu, pois, para o SHALSTAB, quanto maior o volume de precipitação necessário para instabilizar a encosta, menor a possibilidade de ocorrência de uma instabilidade. Por exemplo, a classe $< -3,1$ indica que, para uma transmissividade de $65 \text{ m}^2/\text{d}$ é necessário menos que 50mm de precipitação para que haja a possibilidade de um rompimento da encosta, por outro lado, a classe $> -2,2$ indica que é necessário mais de 400mm para que a encosta instabilize.

A Figura 61 apresenta a função CDF gamma invertida na parte superior, e a tradução das classes SHALSTAB (função de ativação utilizada) em relação a probabilidade na parte inferior da figura (ST é a denominação dada para classe SHALSTAB).

Figura 61: Função de ativação para as classes SHALSTAB.





Vale ressaltar que, para cada classe do modelo SHALSTAB foram interpolados linearmente todos os valores da classe continuamente entre as probabilidades máximas e mínimas, definidas na CDF inversa.

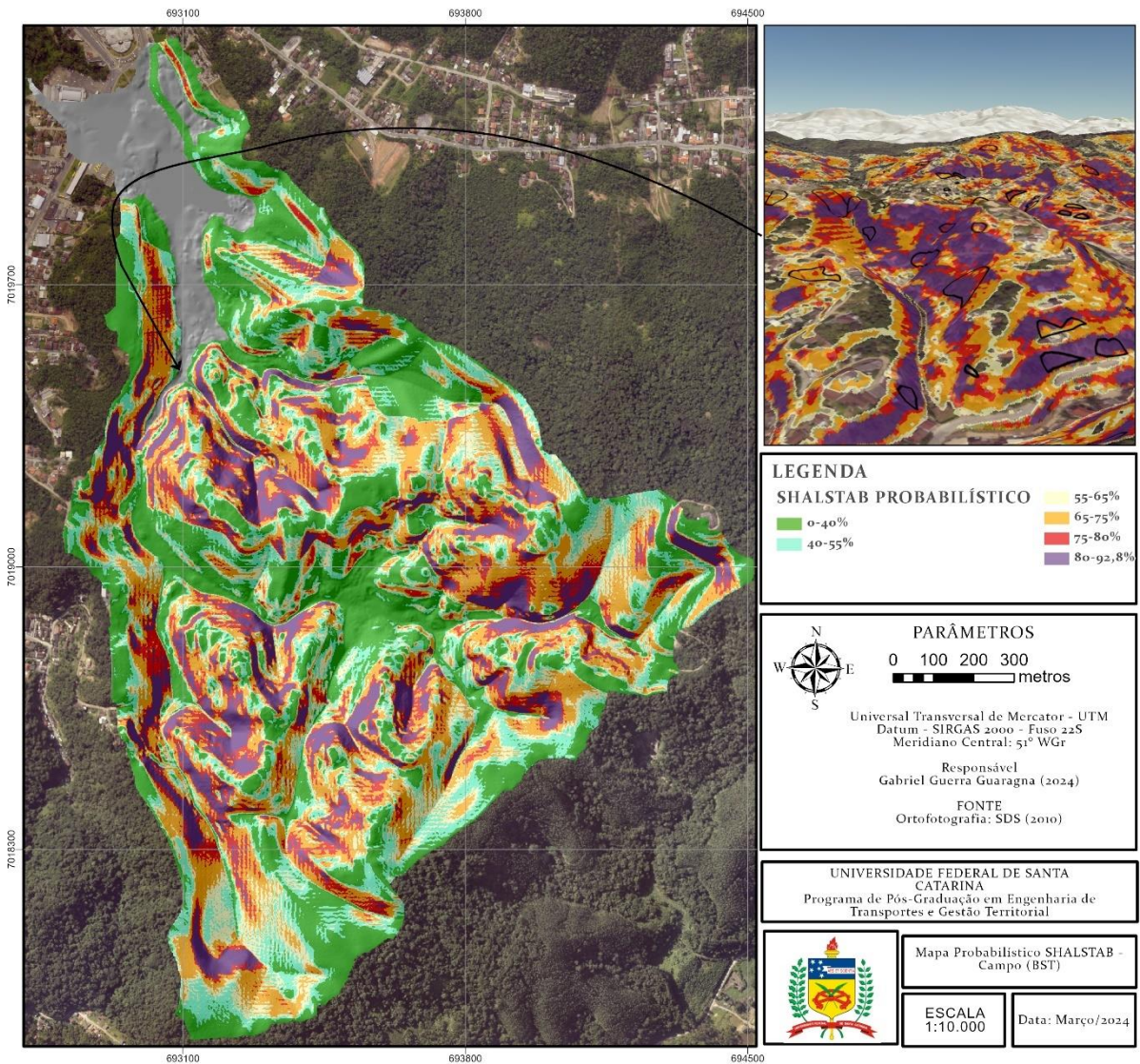
A utilização de tal função de ativação ainda poderia ser melhorada caso as condutividades hidráulicas e profundidade do solo tivessem sido definidas *in-situ*. Dessa forma, seria possível definir com maior grau de certeza a transmissividade e, portanto, os limiares possivelmente mais realistas de precipitação para a área de estudo. O que se quer dizer com isso é que a transmissividade de 65m²/d que delimitou as quantidades de precipitação para as classes SHALSTAB pode não ser a correta para a sub-bacia em questão. Ainda assim, como a classificação de Dietrich e Montgomery (1998) foi concebida para gerar resultados satisfatórios nos mais diversos casos, permitiu-se negligenciar este ponto.

Outra possibilidade de adotar a função de ativação nesta configuração é a de que se faz possível criar cenários para a estabilidade das encostas, por exemplo, se necessário for, pode-se definir a função cdf gamma inversa considerando previsões de precipitações futuras permitindo-se ter uma resposta futura quanto a instabilidade da encosta. Além disso, por ser feita uma ligação entre precipitação e probabilidades, pode-se reverter o mapa probabilístico em um mapa de precipitações críticas necessárias para instabilizar a encosta. Esta última hipótese será apresentada em capítulo subsequente.

De toda forma, as duas informações são atreladas uma à outra, entretanto, uma pode ter maior eficiência a depender de quem está utilizando a informação. Para o gestor, que analisa a logística do desastre, o mapeamento representando precipitações pode se mostrar mais interessante ao passo que para a implementação de um plano diretor, o probabilístico pode trazer mais informações.

Definida a função de ativação foram executadas 100.000 simulações SHALSTAB utilizando os dados coletados em campo através do BST, gerando o mapeamento apresentado na Figura 62.

Figura 62: Mapa probabilístico SHALSTAB BST



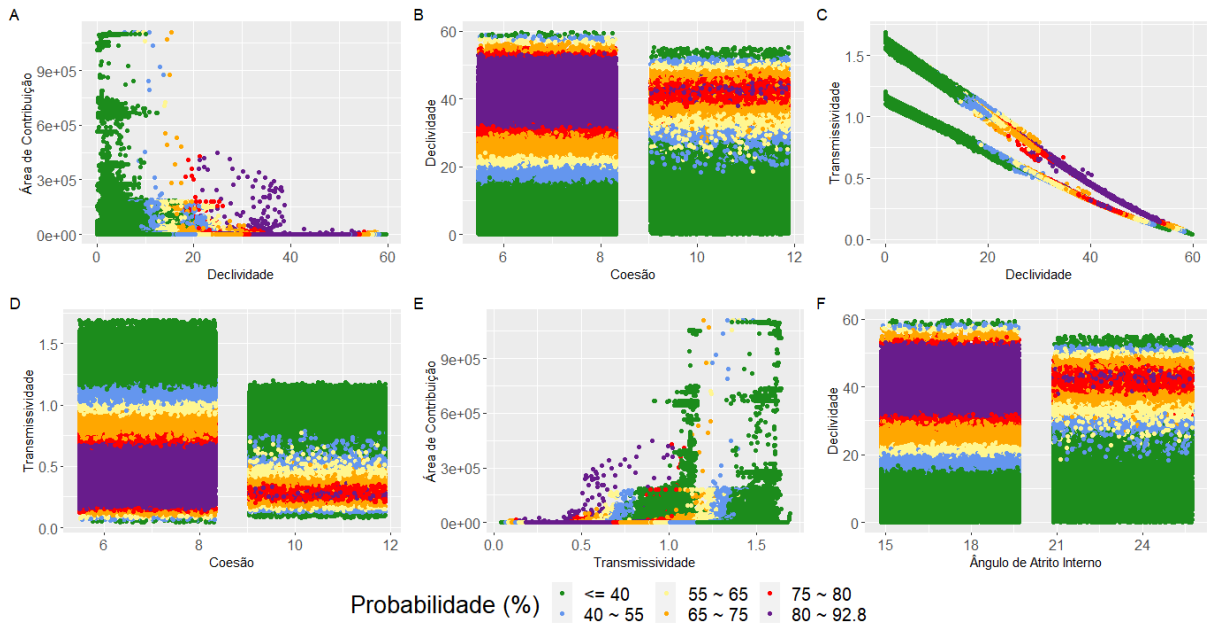
Como observado nos mapeamentos determinísticos, novamente há a tendência a instabilidade na sub-bacia, mas, diferentemente dos mapeamentos anteriormente citados o probabilístico foi capaz de setorizar áreas com maior ou menor instabilidade. Uma grande vantagem da metodologia probabilística é ser capaz de superar tendências discretas. Além disto, diferentemente dos modelos determinísticos, faz-se possível incorporar variações nos parâmetros, mesmo eles indicando por si só a fragilidade local.

Nota-se que as probabilidades de rompimento ficaram muito mais altas do que no mapeamento considerando o BD, algo esperado após a coleta dos dados de resistência ao cisalhamento utilizando o BST. Levanta-se a questão, então, de que a utilização de banco de

dados pode gerar resultados sub ou superestimados. Na sub-bacia em questão, parece ter havido uma subestimação.

Para entender melhor a relação entre os parâmetros e variáveis que geraram o cenário da Figura 62, foram definidos gráficos de dispersão relacionando cada pixel do mapa com diferentes combinações destas variáveis (Figura 63).

Figura 63: Relações entre variáveis predictoras e probabilidades – BST.



Assim como no mapeamento considerando o BD, as respostas das variáveis para o modelo BST é bastante parecida.

No gráfico (D) é apresentada a relação entre a coesão e a transmissividade das encostas para com a probabilidade gerada, observa-se uma tendência clara na geração de probabilidades superiores a 80% em transmissividades e coesões baixas. Novamente, isto se deve ao fato de que transmissividades de baixa magnitude indicam maior potencial de retenção de água no solo, aumentando as forças atuantes e reduzindo a resistência ao cisalhamento. A coesão por sua vez representa a ligação entre as partículas, com o aumento da saturação por conta da baixa transmissividade, em dado momento perde-se gradativamente a parcela coesiva do solo.

Da mesma forma que no mapeamento BD, a área de contribuição (ab) e a declividade (A) demonstram um forte controle topográfico na instabilidade das encostas da sub-bacia. Percebe-se que declividades acima dos 30° conferem as maiores probabilidades de ruptura.

Quanto ao gráfico (E), novamente nota-se o forte controle topográfico, ou seja, a clara dominância de declividades elevadas para a resposta de altas probabilidades e pouca

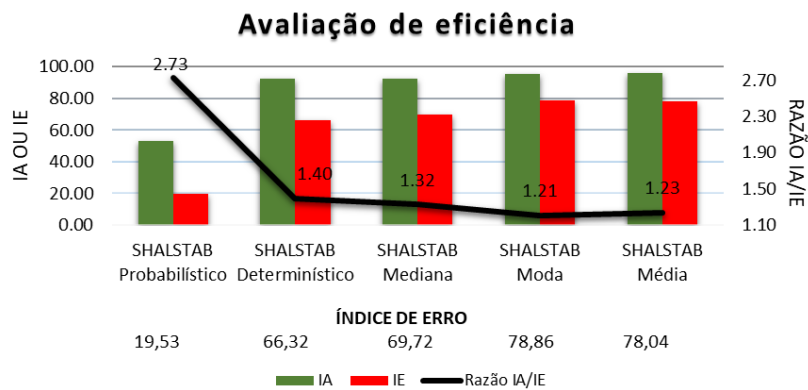
influência da área de contribuição. No gráfico (C) observa-se a tendência clara de transmissividades baixas gerarem altas probabilidades e, no gráfico (F), quanto menor o ângulo de atrito interno, maior a probabilidade de ruptura. Quanto maior o ângulo de atrito interno, maior a parcela de resistência ao cisalhamento do solo e, portanto, maior a sua resistência.

6.7.3 Validação dos mapas: BST

Três métodos de validação foram empregados, assim como no caso BD, o ROC/AUC, os índices de acerto e erro e a Entropia Cruzada, somente aplicada ao mapeamento probabilístico.

Em relação ao índice de acerto e erro, vale ressaltar, por si só não conferem uma validação completa dos modelos. Como mencionado previamente, os índices conferem uma análise global dos resultados, assumindo que o rompimento da encosta ocorreu de uma só vez em toda a cicatriz. A Figura 64 apresenta a relação entre os índices para todos os mapas considerando os dados de campo.

Figura 64: Índices de acerto e erro dos mapas BST

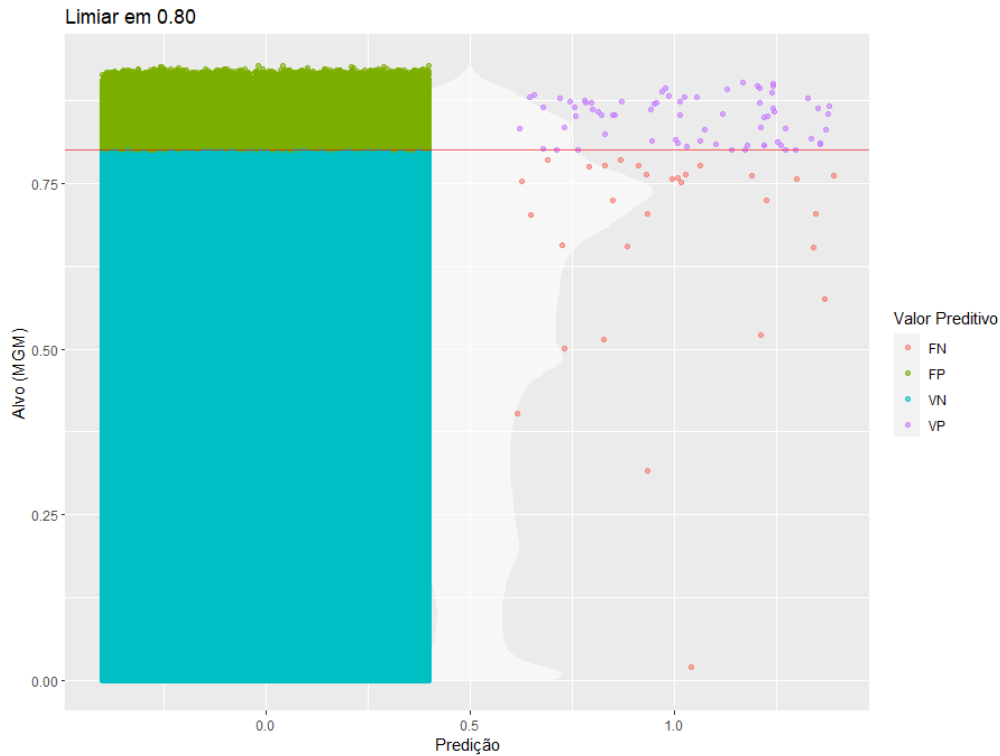


De fato, os mapeamentos determinísticos e estatísticos não foram capazes, de forma alguma, de trazer alguma informação que auxilie na tomada de decisão. De nada serve um modelo que consegue prever 90% das cicatrizes, mas ao mesmo tempo erra 70% assumindo ser instável onde não há evidências. Os índices variaram de 1,4 a 1,21, sendo o mapeamento determinístico o que melhor se comportou em relação as cicatrizes.

Por sua vez, o mapa probabilístico conseguiu superar o determinismo. A razão IA/IE foi um pouco menor do que no mapeamento considerando o BD, que apresentou uma razão de 2,87. Todavia, o índice de acerto isoladamente aumentou. No mapeamento BD este índice era de 48%, no mapeamento BST passou a ser 53,32%. Da mesma forma que houve um aumento do IA, houve também do IE, passando de 16,71% para 19,53%.

A definição do limiar ótimo do modelo probabilístico foi executada considerando os centroides de ruptura, a partir dos quais foram definidas as estatísticas Verdadeiro Positivo (VP), Falso Positivo (FP), Verdadeiro Negativo (VN) e Falso Negativo (FN). Para averiguar a relação entre elas, foi construído o gráfico da Figura 65.

Figura 65: Definição do limiar de instabilidade BST

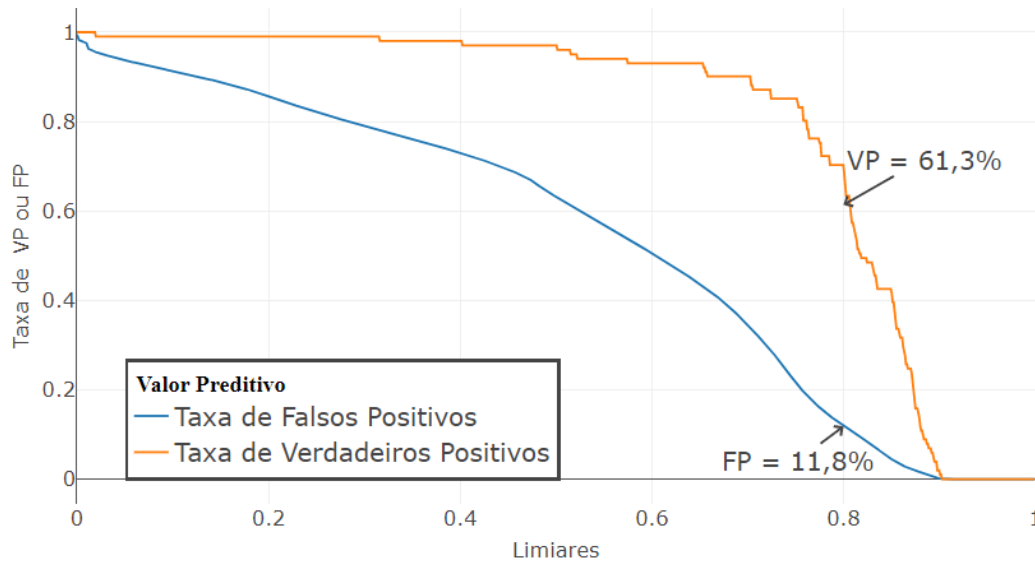


Como mencionado e explicado no capítulo de validação BD, o que se investiga é reduzir os valores de FN e FP, buscando pelo maior limiar possível, com uma taxa de erro, ou seja, as estatísticas FP e FN baixas. Na configuração de limiar de estabilidade em 80% quase todos os centroides foram corretamente classificados e há uma parcela bastante baixa de FP.

Comparando com o modelo probabilístico BD, foi possível aumentar significativamente o limiar, de 60% para 80%. Isso significa dizer que no modelo BD, considerava-se que a partir de uma probabilidade de 60% a encosta estaria instável, dando uma margem de 40% para erros. Após a coleta de dados em campo foi possível reduzir esta margem para 20% apenas.

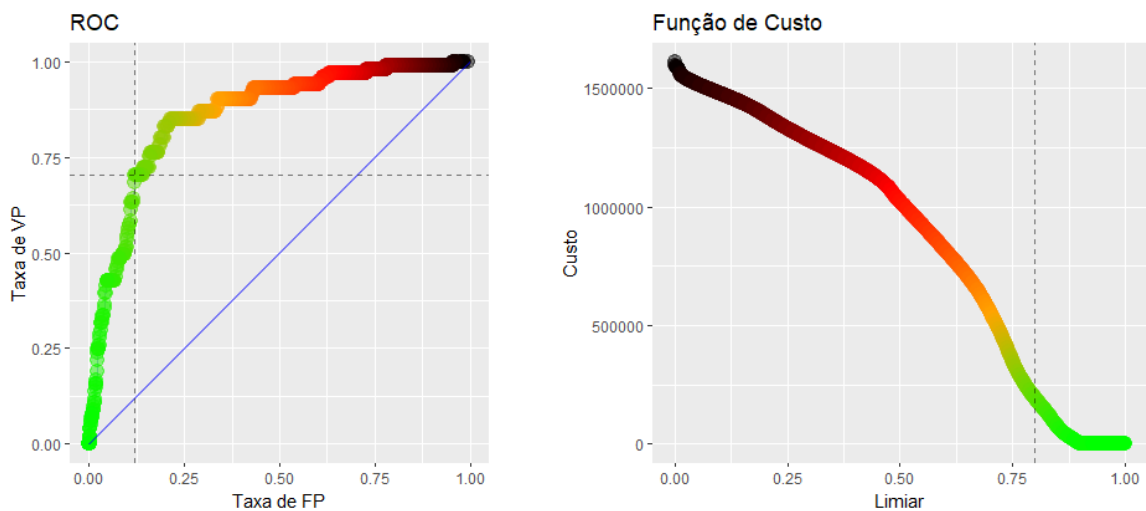
A variação dos limiares é constante, resultando em diferentes taxas de VP e FP. Portanto, na Figura 66 é apresentada esta variação e o consequente embasamento da escolha pelo limiar de 80%.

Figura 66: Taxa de FP e VP em relação aos diferentes limiares BST



Quanto ao *trade-off*, considerou-se novamente que a taxa de FN é 10 vezes mais perigosa que a taxa de FP. Apresentados na Figura 67 estão a curva ROC e a função de custo associada.

Figura 67: Curva ROC e função de custo associada BST



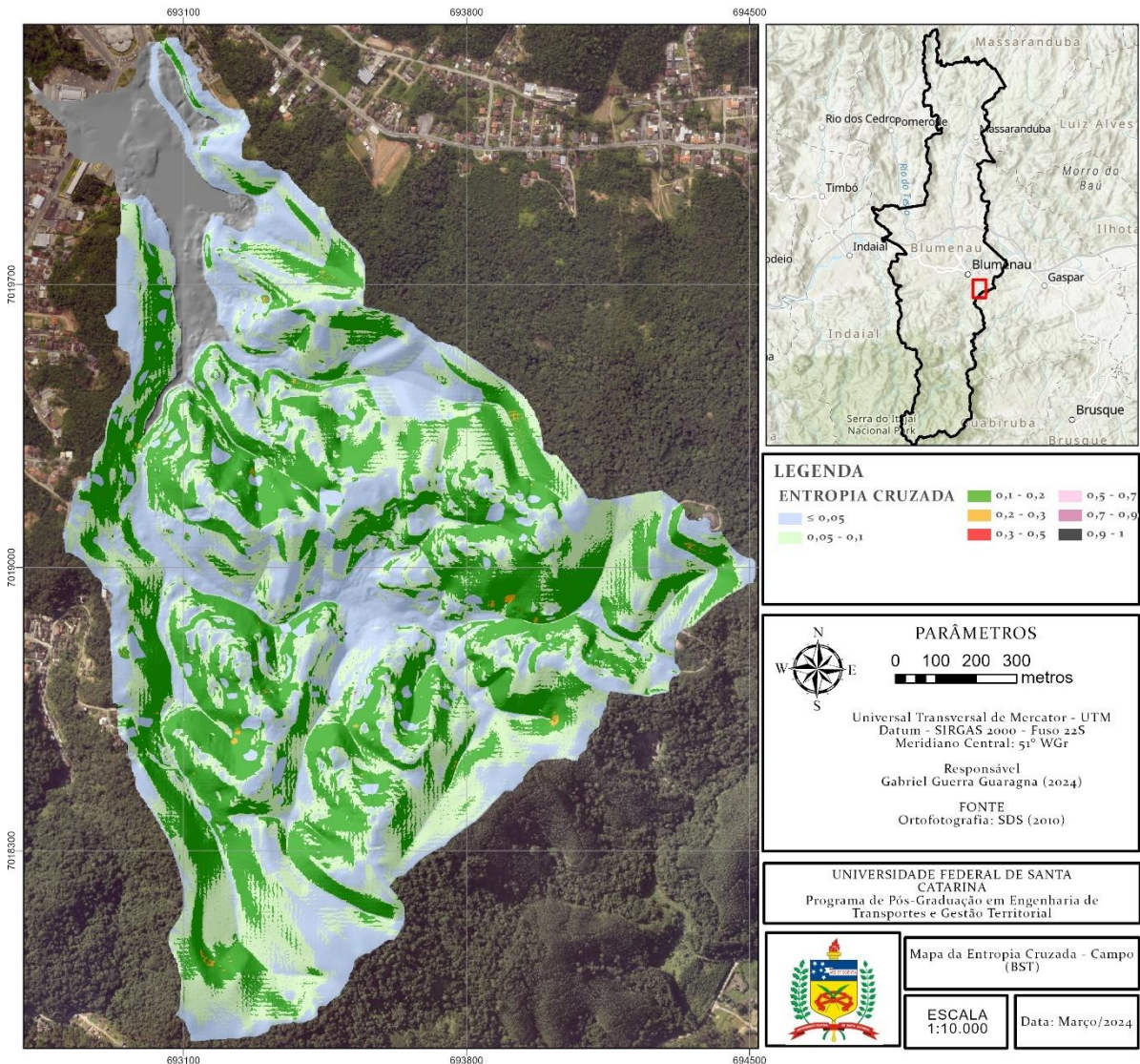
A partir dos gráficos, as linhas tracejadas indicam o limiar de 80%, verifica-se um mapeamento com taxa de VP de 61,3%, uma taxa de FP de aproximadamente 11,8% e um custo associado de 191.984. Caso o limiar fosse 0,85, a taxa de VP seria de 41,6%, a taxa de FP passaria para 4,5% e o custo passaria a ser 73.464. Em comparação com o modelo BD, elevou-se o limiar em 20%, a taxa de VP aumentou aproximadamente 4,3% e a taxa de FP em aproximadamente 3,04%.

Quanto a curva ROC e o AUC associado, não se viu razão em plotar estes resultados para os mapeamentos estatísticos e determinístico visto os modelos não serem satisfatórios. O

AUC referente ao modelo probabilístico BST resultou em 0,896 enquanto que o modelo BD resultou em 0,887, demonstrando uma melhora singela do mapeamento.

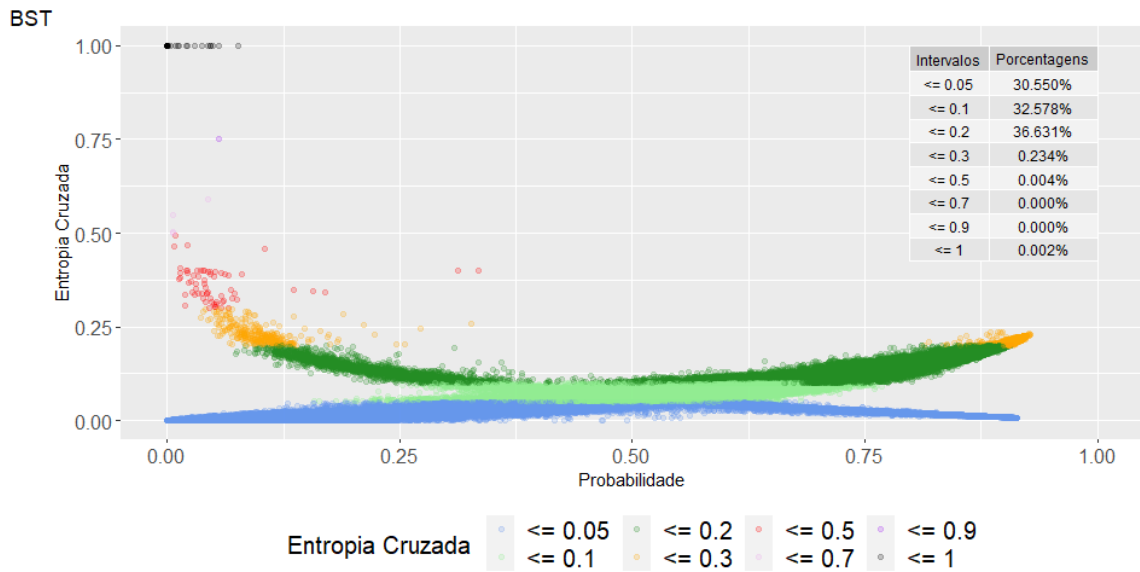
A última validação considerada foi a Entropia Cruzada, apresentada na Figura 68.

Figura 68: Entropia Cruzada – SHALSTAB probabilístico (BST)



Os erros atrelados às cicatrizes parecem menores no mapeamento BST, todavia, parece também haver maior superestimação, ou seja, consideração de áreas com altas probabilidades onde não há evidências de movimentações. Para melhor visualizar estes erros, foi construído o gráfico apresentado na Figura 69, que relaciona as probabilidades e os erros da entropia.

Figura 69: Relação Entropia Cruzada e Probabilidades (BST)

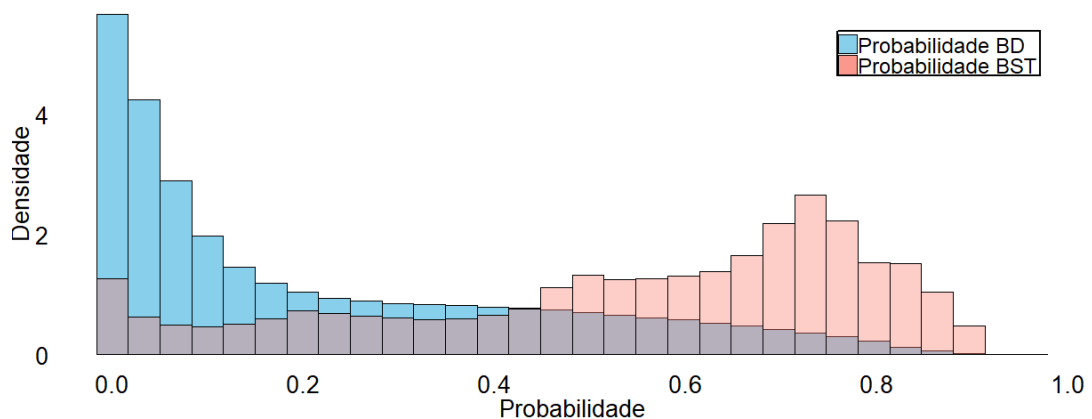


O gráfico apresentado demonstra uma redução de erros relacionados a subestimação, ou seja, a maior parte dos pixels no interior das cicatrizes foi mapeada com altas probabilidades. Em contrapartida, também houve aumento dos erros relacionados à superestimação, o que indica que o mapeamento aponta probabilidades altas de ruptura onde não há evidências de movimentações.

6.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS PROBABILÍSTICOS

O gráfico apresentado na Figura 70 demonstra a relação entre a subestimação e superestimação para os mapeamentos BD e BST.

Figura 70: Relação entre os mapeamentos probabilísticos BD e BST



Verifica-se maior consistência do modelo BST, onde é possível verificar a dominância de probabilidade mais elevadas de ruptura na área da sub-bacia. Em contrapartida, o modelo BD claramente demonstrou uma subestimação das probabilidades com uma densidade de probabilidade bastante elevada para probabilidades muito baixas de

rupturas em relação à realidade do local. Entende-se que a resposta do modelo probabilístico BST faz maior sentido em relação a realidade da sub-bacia.

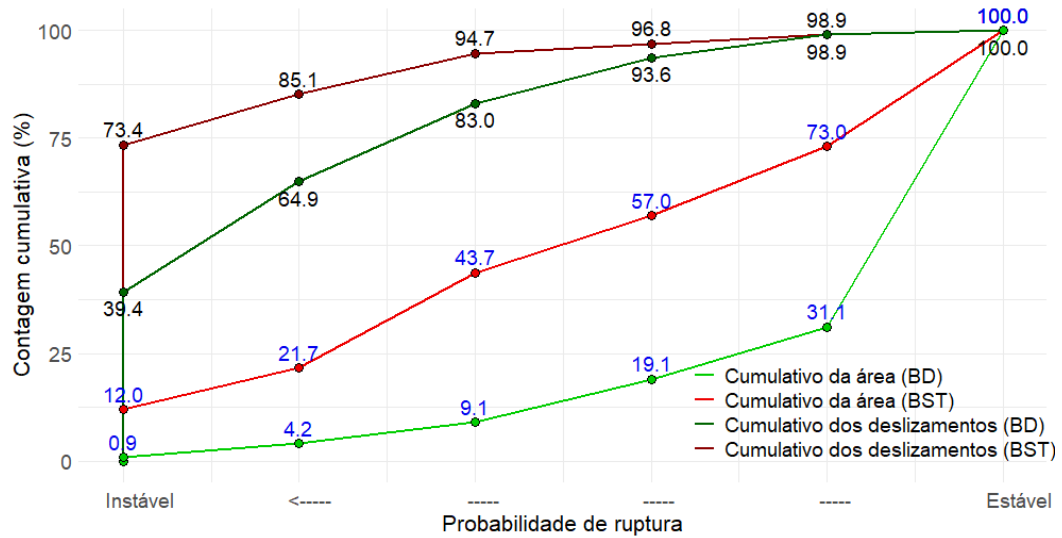
Com o fim de comparar diretamente ambos os modelos probabilísticos, foi considerado o princípio definido por Dietrich et al. (2001), onde os autores defendem que o melhor modelo é aquele que consegue definir áreas instáveis coincidentes com as cicatrizes e também, que estas áreas instáveis ocupem uma pequena área do local analisado como um todo.

Para proceder com a análise foram levantadas duas situações: 1) foi assumido que a área de uma cicatriz inteira é instável, mas que o movimento deve ter iniciado em um ponto específico dentro do polígono da cicatriz. Não se sabe qual é o ponto específico, mas entende-se que o mais provável seja que tenha ocorrido na célula com maior probabilidade de falha gerado pelos modelos. Portanto, o procedimento se dá através dos seguintes passos:

1. Extração da célula com valor máximo para cada cicatriz da área de estudo;
2. Agrupamento por classes e contagem de células para cada classe;
3. Ordenação decrescente do agrupamento e contagem cumulativa das classes.

Para esta situação, espera-se que quanto maiores as contagens cumulativas nas classes mais instáveis, melhor a aderência do modelo para com as cicatrizes. A situação 2) define a área ocupada para cada classe, o procedimento é feito através da ordenação das classes e contagem cumulativa da área ocupada por cada classe. O cenário ideal deve apresentar altas contagens cumulativas para a aderência do modelo as cicatrizes e baixas contagens cumulativas para as áreas. A Figura 71 apresenta o resultado destes procedimentos para ambos os mapas BD e BST probabilísticos considerando a classificação apresentada nos respectivos mapas.

Figura 71: Comparação entre os modelos probabilísticos



Observa-se que para probabilidades acima de 80% o modelo probabilístico baseado em dados de campo (BST) foi capaz de mapear 73,4% das cicatrizes, enquanto que a área referente a essas probabilidades é de apenas 12%. Em contrapartida o modelo BD obteve uma concordância de apenas 39,4% para probabilidades acima de 80% e a área ocupada por essas células é de 0,9%. Nas análises anteriores foi definido o limiar de instabilidade do modelo BD em 60%, verificamos no gráfico da Figura 71 que o modelo nesta configuração mapeia apenas 9,6% a mais as cicatrizes do que o modelo BST com o limiar em 80%.

Novamente levanta-se a questão, qual limiar um gestor ou analista deve considerar para suas conclusões. O gráfico da Figura 71 demonstra que se considerada as probabilidades entre 75 a 80% no mapeamento BST como balizador do limiar de risco na área, 21,7% é de risco e 78,3% não, com uma margem de erro de 14,9% de acordo com o inventário de cicatrizes utilizado neste trabalho. Este gráfico reflete a incerteza inerente aos parâmetros utilizados em modelos de mapeamento. Após 100.000 simulações em ambos os modelos fica claro como a utilização de dados confiáveis impactam os resultados. Os dados devem sempre que possível ser levantados em campo e ensaiados cuidadosamente, pois irão afetar a capacidade do modelo em definir corretamente a instabilidade de uma dada área.

Em uma comparação com o mapeamento BD, após todas as validações, verifica-se superioridade do modelo apoiado em dados advindos de campo, especialmente por fazer possível o aumento do limiar em 20% e a sua capacidade de concordância com as cicatrizes.

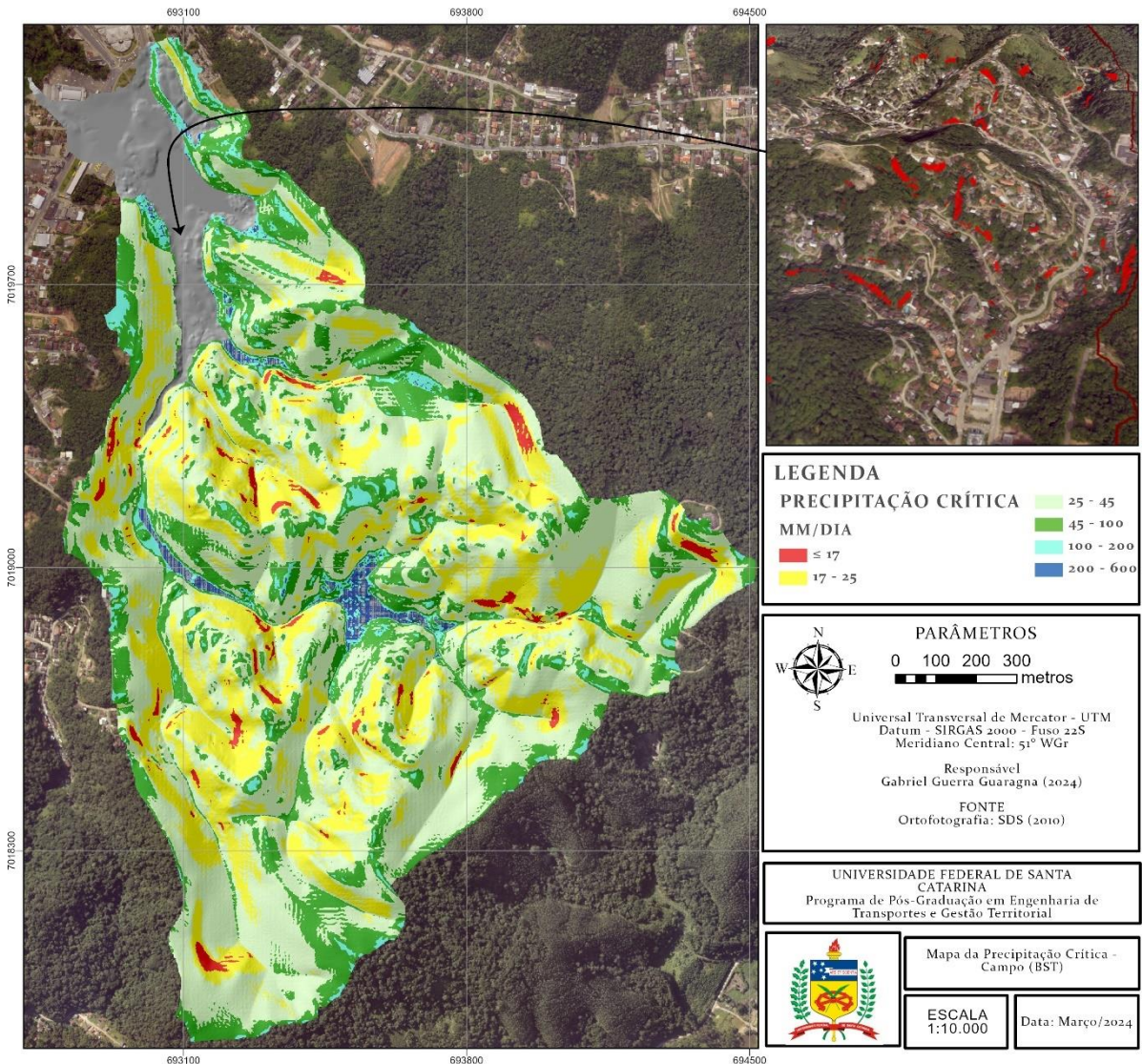
6.9 PRECIPITAÇÃO CRÍTICA

Como mencionado, a função de ativação do modelo probabilístico BST é uma abstração da CDF gamma invertida, a qual dita a probabilidade de que dada precipitação

possa ocorrer, dada as observações temporais da precipitação. Esta distribuição foi construída considerando as precipitações máximas diárias de cada mês, no período de 2000 a 2022.

Ao relacionar as probabilidades do mapa BST com as probabilidades das precipitações da distribuição CDF pôde-se traduzir tal mapeamento para um mapa de precipitação crítica, apresentado na Figura 72.

Figura 72: Precipitação Crítica



É importante destacar que todo o modelamento foi concebido com base na Tabela 5, a qual considera a definição das precipitações para cada classe com base em uma transmissividade de $65\text{m}^2/\text{d}$. Outro destaque importante é o de que o mapeamento indica precipitações para um dia inteiro, ou seja, se um pixel apresenta 17mm para romper, significa que é necessário 17mm de precipitação em 24 horas para que haja a possibilidade de rompimento.

A informação contida neste mapa é análoga à apresentada no mapa probabilístico, mas traduz a informação para um termo muito comum e conhecido: chuva.

Quando se pretende divulgar a informação a respeito de estabilidade ou não de uma área ou encosta, muitas vezes se faz o uso do fator de segurança (FS), de índices de suscetibilidade (SI) ou de probabilidades. Cada maneira de expressar a situação de risco tem suas vantagens e desvantagens.

O primeiro é comumente utilizado e amplamente conhecido entre engenheiros, sendo o meio mais comum de expressar a estabilidade. O segundo é altamente subjetivo e impossibilita a definição de projetos de engenharia, além de não haver um consenso global do seu significado real. A probabilidade, ainda que não contemplada nas normas técnicas no Brasil, permite o entendimento subjetivo da possibilidade de ocorrência de uma movimentação em dada área, isto por que seja um engenheiro, um professor, um civil ou um estudante de ensino médio, todos conhecem o que uma probabilidade significa.

Mesmo que existam tantas formas de informar quanto a essa problemática, em geral, não se conhece os motivos que levaram a constatação de que a encosta é instável. Seja por que o FS é menor que 1, ou que o SI indica instabilidade ou que a probabilidade é alta, subjetivamente existe uma série de dúvidas na mente das pessoas que trabalham ou estão sujeitas aos processos de movimentação, mas todos sabem e relacionam a precipitação às ocorrências de movimentações gravitacionais de massa. É exatamente por essa razão que o mapeamento da precipitação crítica se faz tão importante.

Usando os conceitos mencionados até o momento, pode-se abstrair ainda mais. Seguem algumas possibilidades que devem ser testadas e modeladas usando as funções de ativação considerando a precipitação:

- 1) **Cenários cumulativos.** Muitas vezes a ocorrência da movimentação não se dá pela precipitação de um único dia, mas sim pelo acúmulo decorrido por conta de vários dias consecutivos com precipitações.
- 2) **Cenários de intensidade e duração do evento chuvoso.** Em alguns casos a precipitação pode não durar um dia inteiro, mas tem uma intensidade tal que o solo não é capaz de suportar, fazendo com que a encosta rompa por ausência de coesão e aumento de peso da massa de solo.
- 3) **Cenários futuros.** É possível prever quando um evento climático intenso irá ocorrer e os volumes atrelados de precipitação. Neste caso, pode-se utilizar o método para modelar a resposta futura da estabilidade das encostas com base no cenário futuro da precipitação esperada para um período específico.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou a criação de um modelo probabilístico para setorização de áreas instáveis em um dado terreno. A concepção do modelo levou em consideração o conceito de incertezas relacionadas à geotecnia e do próprio modelo determinístico base incorporado. Desta forma, a proposta inicial para a avaliação de deslizamentos translacionais rasos foi alcançada e gerou como resultado mapeamentos com alto grau de acurácia.

A vantagem do método proposto é a possibilidade de gerar resultados eficazes na definição de áreas instáveis, não excluindo a importância de trabalhos de campo, mas permitindo uma aproximação aceitável das áreas de instabilidade caso não for possível uma coleta de campo detalhada. Técnicas de sensoriamento remoto e utilização de bancos de dados foram capazes de capturar a maioria das cicatrizes sem superestimar demasiadamente as áreas instáveis devido às implementações de funções densidade de probabilidade e ativação no decorrer das iterações do modelo.

O mapeamento com dados BST e retificação do mapa geotécnico gerou melhores resultados. O mapeamento BST resultou em um aumento na confiança do limiar de instabilidade em 20%. Nas análises, foi definido o limiar de instabilidade do modelo BD em 60%, foi possível verificar que o modelo nesta configuração mapeia apenas 9,6% a mais as cicatrizes do que o modelo BST com o limiar em 80%. A taxa de verdadeiros positivos e falsos positivos aumentou em aproximadamente 4,3% e 3,04% respectivamente e o AUC aumentou de 0,887 (BD) para 0,896 (BST). Em relação aos mapas determinísticos, o banco de dados gerou resultados melhores.

As saídas do modelo SHALSTAB estão diretamente relacionadas a variável transmissividade, que apresenta ligação direta com a precipitação. Caso a unidade geotécnica apresente transmissividades baixas e a quantidade de precipitação ocorrida for superior a capacidade do solo de drenar a água para fora do sistema, há o incremento de poropressões, aumento do peso específico e redução da resistência ao cisalhamento, fazendo com que se aumente o grau de instabilidade no local. Por existir esta relação direta entre precipitação e capacidade de drenagem do solo, a utilização da função de ativação baseada na série histórica permitiu aferir a probabilidade de ruptura dado valores reais de precipitação que ocorreram em algum momento da história de precipitações no local, e que podem vir a ocorrer novamente com uma probabilidade atrelada. O mapeamento gerado é um recorte da resposta do terreno dado a história das precipitações máximas diárias registradas no município nos últimos 22 anos.

Desta relação, foi possível além de gerar um mapa probabilístico, gerar um mapa indicativo de quantidades de precipitação necessárias para causar a instabilidade no local, com uma probabilidade associada para a sua ocorrência. O resultado pode indicar uma precipitação de 20mm/dia, por exemplo, mas atrelado a essa quantidade há também uma probabilidade de que a movimentação ocorra caso esse volume de fato venha a ocorrer.

Outra perspectiva importante é a de que se faz possível definir cenários de precipitação e obter a resposta do terreno. Caso seja registrado uma intensidade de 20mm em 15 minutos a resposta do terreno será diferente de uma intensidade de 5mm em 15 minutos. Da mesma forma, o cenário cumulativo pode ser incorporado no modelo. Se houver um registro de precipitação de 200mm acumulados em 3 dias existirá uma resposta diferente de se houver um cenário acumulado de 100mm.

O modelo foi definido com o intuito de ser utilizado como um sistema de monitoramento, portanto há a possibilidade de atrelar ao modelo previsões do tempo para que se possa saber com antecedência quais regiões em uma dada área poderão ser instáveis e qual a probabilidade de ocorrência de uma movimentação caso o volume de precipitação ocorra.

Do ponto de vista da tomada de decisão em relação aos eventos extremos, o método permite a mais rápida interpretação dos resultados e confiança dos mesmos devido ao fato de que a interpretação subjetiva de índices adimensionais é ultrapassada ao se considerar a probabilidade. O SHALSTAB fornece números subjetivos como índices demonstrando estabilidade ou instabilidade, o que pode causar confusão para um gestor público, projetista ou analista que não esteja familiarizado com o método. A probabilidade ou estocasticidade é uma informação diferente, ela indica uma probabilidade, após um conjunto de simulações de que uma dada área poderia ser instável. Assim, contribui-se com a política de solo no sentido de possibilitar maior robustez e velocidade no mapeamento de áreas potencialmente de risco.

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para que seja dada continuidade a esta pesquisa, recomenda-se que os seguintes itens sejam executados:

- Aumentar o número de ensaios que determinam os parâmetros de resistência para assim melhorar as distribuições densidade de probabilidade.
- Realizar ensaios de condutividade hidráulica saturada na área de estudo, afim de atestar valores reais deste parâmetro e da transmissividade.
- Definir a transmissividade global da área de estudo.
- Realizar ensaios que permitam a determinação da profundidade do solo com maior rigor, visto a importância desta variável na ruptura das encostas.
- Definir com maior detalhe a geologia e a pedologia da área de estudo.
- Atrair ao modelo proposto informações antropológicas. A área de estudo possui uma forte influência antropogênica na instabilidade das encostas e o modelo SHALSTAB por si só, não afere tal influência.
- Comparar o modelo proposto com outros existentes.
- Definir áreas vulneráveis e construir um banco de dados com informações socioeconômicas da região, com o fim de definir áreas de risco.
- Testar funções de ativação considerando a precipitação de maneiras distintas, como cenários cumulativos, de intensidade e duração e cenários futuros.
- Validar o mapa de precipitação crítica a partir de dados precisos indicando a precipitação medida no momento em que ocorrer uma movimentação.
- Otimizar o algoritmo no sentido de melhorar sua performance. O processamento de 100.000 simulações em um computador com Intel Core i7 e 16GB Ram levou aproximadamente 4 horas.

9 REFERÊNCIAS

- _____. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores – Brasília: Ministério das Cidades; **Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT**, 2007. 176 p.
- AITCHISON, G. D; GRANT, K. The P.U.C.E. programme of terrain description, evaluation and interpretation for engineering purposes. In **Proceedings of the Fourth Regional Conference in Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Cape Town, v. 1, p. 1-8. 1976.
- ALMEIDA, R, C. CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CAMBISSOLOS DERIVADOS DE ARENITO SUBMETIDOS A DIFERENTES CONDIÇÕES DE MANEJO. 1998. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.
- ALVES, L, E, C. **Avaliação das variáveis mecânicas em solos de encostas naturais de Blumenau, SC**. 2018. 136 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- AMORIM, J, V, A. **PEDOMETRIA APLICADA AO MAPEAMENTO DE SOLOS NO DELTA DO PARNAÍBA, PIAUÍ**. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2019.
- AUMOND, J, J. **Geologia e Paleoambiente**. In: Bacia do Itajaí: Formação, recursos naturais e ecossistemas. EDIFURB: 2005. p. 20-44. Disponível em: http://www.furb.br/especiais/download/947574-3173/site%20observa%202_2%20geologia.pdf, acesso em 02/11/2020).
- AVILA, M, R, R. **“EM BLUMENAU TUDO É RISCO”:** A PERCEPÇÃO E A GESTÃO DOS DESASTRES NA COMUNIDADE DA RUA PEDRO KRAUSS SÊNIOR (BLUMENAU/SC) NO PERÍODO DE 2008 A 2015. 2015. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Desenvolvimento Regional, Centro de Ciências Humanas e da Comunicação, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2015.
- BAECHER, G, B; CHRISTIAN, J, T. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. [SI]: John Wiley & Sons Ltd, 2003. 620 p. ISBN 0-471-49833-5.
- BARTOLOMEU, D. **ZONEAMENTO GEOAMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE CRISTAIS PAULISTA (SP) COM BASE NA CARACTERIZAÇÃO E ASPÉCTOS EVOLUTIVOS DO MEIO FÍSICO**. 2009. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2009.
- BASTOS, C, A, B. Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais Não Saturados. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1999.
- BERTONE, P; MARINHO, C. GESTÃO DE RISCOS E RESPOSTA A DESASTRES NATURAIS: A VISÃO DO PLANEJAMENTO. **Consad**, Brasília, p. 2-24, abr. 2013.
- BEVEN, K, J; KIRKBY, M, J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel 102 variable de l'hydrologie du bassin

versant. Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BITAR, O. Y; FREITAS, C. G. L; MACEDO, E. S. **Guia Cartas geotécnicas: orientações básicas aos municípios**. São Paulo: IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2015.

BLUMENAU. **Carta de Uso Recomendado do Solo (Área 09) Região Rua Araranguá e Transversais**. Blumenau: Secretaria Municipal de Planejamento Urbano Diretoria Geologia, 2010. 2 p. Relatório técnico concedido pela defesa civil do município, não publicado e de uso interno.

BOER, P T de; KROESE, D P; MANNOR, S. A Tutorial on the Cross-Entropy Method. **Annals Of Operations Research**, v. 134, p. 19-67, fev. 2005.

BONATE, P. L. A Brief Introduction to Monte Carlo Simulation. **Clinical Pharmacokinetics**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 15-22, 2001. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.2165/00003088-200140010-00002>.

BORGES, M, E, S et al. Emprego do processamento digital dos parâmetros morfométricos no mapeamento geomorfológico da Bacia do Rio Preto. **Espaço & Geografia**, v.10, n.2, p.401-429, 2007.

BRITO, F, GUIMARAES HORTA, C, J; AMARAL, E, F, L. A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas. **Open Science Framework Preprints**, Agosto de 2001, p. 13.

BRUM, M, B, P; ANTUNES, A, M. A Problemática dos Taludes Urbanos: uma Revisão Bibliográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Congresso**. Salvador: Abms, 2018. p. 1-11.

CABRAL, V, C; REIS, F, A, G, V; MENDOZA, C, M; OLIVEIRA, A. Model-based assessment of shallow landslides susceptibility at a petrochemical site in Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 1394-1419, 6 abr. 2022. Revista Brasileira de Geomorfologia. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i2.2084>.

CAFLISCH, R. E. Monte Carlo and quasi-Monte Carlo methods. **Acta Numerica**, [S.L.], v. 7, p. 1-49, jan. 1998. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0962492900002804>.

CAPUTO, H. P. **MECÂNICA DOS SOLOS E SUAS APLICAÇÕES**: Fundamentos. 6. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988. 244 p. v. 6.

CAPUTO, H.P. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. Rio de Janeiro: LTC, 6º edição, 1996.

CARAMEZ, M. L. **MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DA MICROBACIA DO ITACORUBI – FLORIANÓPOLIS/SC – APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB PARA A CONFECÇÃO DE MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS RASOS DE ENCOSTAS**. 2017. 187 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina,

Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil., Florianópolis, SC, 2017.

CATANI, F; SEGONI, S; FALORNI, G. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. **Water Resources Research**, v. 46, W05508, p. 1–15, 2010.

CATEN, A, T *et al.* Pedometria aplicada à predição de classes de solos utilizando de regressões logísticas múltiplas. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, p. 7685-7692, abr. 2009.

CERRI, L, E, S; NOGUEIRA, F, R. Mapeamento e gestão de riscos de escorregamentos em áreas de assentamentos precários. In: GUIMARÃES, S, T, L *et al* (org.). **GESTÃO DE ÁREAS DE RISCOS E DESASTRES AMBIENTAIS**. Rio Claro: Igce/Unesp/Rio Claro, 2012. p. 0-406.

CHAGAS, C, S. **MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS POR CORRELAÇÃO AMBIENTAL E REDES NEURAIS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO DOMÍNIO DE MAR DE MORROS**. 2006. 238 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

CHAGAS, C, S; FERNANDES FILHO, E, I; BHERING, S B. Relação entre atributos do terreno, material de origem e solos em uma área no noroeste do estado do Rio de Janeiro. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 33, p. 147-162, abr. 2013.

CHOWDHURY, R.N. **Slope Analysis**. 1. ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 429 p. v. 22. ISBN 0-444-41724-9.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188 p.

CHUNG, C, F; FABBRI, A, G. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. **Natural Hazards**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 451-472, nov. 2003. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/b:nhaz.0000007172.62651.2b>.

CLARE, M. C. A; LEIJNSE, T. W. B; MCCALL, R. T; DIERMANSE, F. L. M; COTTER, C. J; PIGGOTT, M. D. Multilevel multifidelity Monte Carlo methods for assessing coastal flood risk, **Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.** [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-74>, in review, 2022.

COROMINAS J. *et al.* Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bulletin Of Engineering Geology And The Environment**, [S.L.], v. 73, p. 209-263, 24 nov. 2013.

COROMINAS, J; MAVROULI, O, C. **Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies**. 7. ed. Safeland, 2011. 173 p. Disponível em: <https://www.ngi.no/download/file/5989>. Acesso em: 08 jan. 2022.

CORREIA, M, R, D. **AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE MODELAGEM E DE DADOS ESPACIAIS APLICADAS À ANÁLISE DE RISCO A DESLIZAMENTOS NO BAIXO VALE DA BACIA DO RIO ITAJAÍ-ÁÇU SC**. 2015.

425 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CORTELETTI, R. C. **Metodologia para Análise de Riscos Geológico-geotécnicos em Ferrovias**: Estrada de Ferro Carajás (EFC). Ouro Preto: UFOP, 2017. 222 p. ISBN 978-85-288-0351-8.

COSTA, E, A, da. **VALIAÇÃO DE AMEAÇAS ERISCO GEOTÉCNICO APLICADOS À ESTABILIDADE DE TALUDES**. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CRUDEN, D.; LAN, Heng-Xing. Using the Working Classification of Landslides to Assess the Danger from a Natural Slope: Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. **Springer Nature**, p. 3-12, 4 jan. 2015.

CUNHA, J, E., *et al.* Important factors for the dynamism of the mass movements of soil um a pedologic system of Umuarama-PR. **Ambiência**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 197-214, abr. 2015. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/ambiencia.2015.01.12>.

DATA SCIENCE ACADEMY. **Entropia Cruzada Para Quantificar a Diferença Entre Duas Distribuições de Probabilidade**. 2021. Plataforma de ensino online de Ciência de Dados, Big Data, Inteligência Artificial e Blockchain. Disponível em: <https://www.deeplearningbook.com.br/>. Acesso em: 03 mar. 2022.

DAVISON DIAS, R. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tro-picais e subtropicais, **Revista do Instituto Geológico**, Vol. 16, pp. 51 – 55, 1995.

DAVISON DIAS, R. Proposta de uma Metodologia de Estudos Geotécnicos para Implementação de Rodovias, Estradas Rurais e Vicinais em Solos Brasileiros. In: Reunião Anual de Pavimentação. Anais... Florianópolis, 2001.

DEGERING, A. D. **Aplicação, análise e validação de métodos para mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2017.

DIAS, A. M. C.; SAITO, S. M.; FONSECA, M. R. S. Aplicação de dados censitários para caracterização da população exposta em áreas de risco de deslizamentos em Blumenau, santa catarina. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, 7 jan. 2017.

DIETRICH, W, E. *et al.* A PROCESS-BASED MODEL FOR COLLUVIAL SOIL DEPTH AND SHALLOW LANDSLIDING USING DIGITAL ELEVATION DATA. **Hydrological Processes**, [SI], v. 9, n. 66, p. 383-400, 1995.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. Publication **NCASI** (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), 1998. 29p.

DIETRICH, W. E.; BELLUGI, D.; REAL DE ASUA, R. Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for forest management. In: (Ed.). **Land Use and Watersheds: Human Influence on Hydrology and Geomorphology in Urban and Forest Areas**. Washington, DC: AGU, v.2, 2001. p.195-227. (Water Sci. Appl.).

DORTZBACH, D *et al.* Horizontes diagnósticos superficiais de Cambissolos e uso de $\delta^{13}\text{C}$ como atributo complementar na classificação de solos. **Solos e Planejamento: Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1339-1348, ago. 2016.

EL-RAMLY, H. **Probabilistic Analyses of Landslide Hazards and Risks: Bridging Theory and Practice**. 2001. 420 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotechnical Engineering, Department Of Civil And Environmental Engineering, University Of Alberta, Edmonton, 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p.

ESPÍNDOLA, M. S. **Análise dos parâmetros geotécnicos dos solos moles da obra de ampliação do Aeroporto Internacional Hercílio Luz, Florianópolis**. 2011. 215 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, SC, 2011.

FARIAS, I.C. *et al.* **Guia para la elaboracion de estudios del medio fisico; contenido y metodologia**. Centro de Estudios de Ordenacion del Territorio y Medio Ambiente. Espanha. 1984.

FAROUZ, E. KARNIK, B. & STANLEY, R. Case Study: Optimization and Monitoring of Slope Design in Highly Weathered Shale. **Proceedings of the 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics**, pp. 1-12, 2007.

FAWCETT, Tom. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, [S.L.], v. 27, n. 8, p. 861-874, jun. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.

FENTON, G. A., *et al.* Probabilistic methods in geotechnical engineering. In: FENTON Gordon A. (Editor), Workshop presented at ASCE GeoLogan'97 Conference, Logan, Utah, Jul., 1997. **Workshop notes...** Logan, Utah: Sponsored by ASCE Geotechnical Safety and Reliability Committee, Jul, 1997, 95p.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológica geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. da (UFRS) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2000 p. 123-194.

FERNANDES, N, F. *et al.* Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 51-71, out. 2001.

FEUERHARMEL, C. Estudo da resistência ao Cisalhamento e da Condutividade Hidráulica de Solo Coluvionares Não Saturados da Formação Serra Geral. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**: Aplicações na estabilidade de taludes. 3. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2015. 576 p.

FLACH, M, K. **Comparação entre os dados obtidos pelo borehole shear teste ensaio de cisalhamento direto no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

FRATTINI, P; CROSTA, G; CARRARA, A. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. **Engineering Geology**, v. 111, n. 1-4, p. 62-72, fev. 2010.

GAO, F; WU, X; WU, L. An Improved Monte Carlo Method Based on Neural Network and Fuzziness Analysis: A Case Study of the Nanpo Dump of the Chengmenshan Copper Mine. **Hindawi: Mathematical Problems in Engineering**, Changsha, v. 2021, p. 1-17, jan. 2021.

GERSCOVICH, D, M, S. **Resistência ao Cisalhamento**. 102 f. - Curso de Engenharia, Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de textos, p. 158, 2012.

GESSLER, P. E.; MOORE, I. D.; MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, n. 4, p. 421-432, 1995.

GIANNINI, P.C.F. RICCOMINI, C. Sedimentos e processos sedimentares. In: TEIXEIRA, W. et al. Decifrando a Terra. São Paulo: Of. De Textos, p. 167-190, 2001.

GIRÃO, O; CORRÊA, A, C, B; GUERRA, A, J, T. ENCOSTAS URBANAS COMO UNIDADES DE GESTÃO E PLANEJAMENTO, A PARTIR DO ESTUDO DE ÁREAS A SUDOESTE DA CIDADE DO RECIFE - PE. **Revista de Geografia**, Recife, v. 24, n. 3, p. 242-267, dez. 2007.

GORSEVSKI, P, V; GESSLER, P; FOLTZ, R, B; ELLIOT, W, J. Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. **Transactions In Gis**, v. 10, n. 3, p. 395-415, maio 2006.

GROTZINGER, J; JORDAN, T. PARA ENTENDER A TERRA. Porto Alegre : **Bookman**, 2013, p. 738. 978-85-65837-77-4.

GUARAGNA, G.; HIGASHI, R.; VIEK, T. Mapeamento e caracterização da estabilidade das encostas na Sub-bacia do Ribeirão Araranguá através do modelo Random-Forest. *Conjecturas*, [S. l.], v. 22, 2022. DOI: 10.53660/CONJ-1814-2M01. Disponível em: <https://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/1814>. Acesso em: 18 out. 2022.

GUERRA, A. J. T; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia Ambiental**. 1ª. ed. São Paulo, SP: BERTRAND BRASIL, 2006. 192 p.

GUIMARÃES, R, F *et al*. FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA DO MODELO MATEMÁTICO PARA PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS RASOS SHALLOW STABILITY. **Espaço & Geografia**, v. 6, nº 2, p. 133-150, 2003.

HANDY, R, L; WILLIAMS, W, W. Chemical Stabilization of an Active Landslide. **Civil Engineering Magazine**, ASCE, Vol. 37, No. 8, pp.62-65, 1967.

HANDY, R, L. Borehole Shear Test and Slope Stability. **Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering**, ASCE, pp. 161-175, 1986.

HAZEN, A. Discussion: Dams on sand foundations. American Society of Civil Engineers, n.73, p. 199, 1911.

HERMUCHE, P, M *et al.* **Morfometria como Suporte para Elaboração de Mapas Pedológicos: I. bacias hidrográficas assimétricas**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 25 p.

HIGASHI, R. R. **Utilização de um SIG no Desenvolvimento de um Banco de Dados Geotécnicos do Norte do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002a, 143p.

HIGASHI, R, R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2006. p. 398.

HIGHLAND, L. M; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook - A guide to understanding landslides**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008. 129 p.

Hillel, D. (1998) Environmental Soil Physics. **Academic Press**, San Diego, 771p.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. COMMISSION ON ENGINEERING GEOLOGICAL MAPS. **Engineering geological maps: A guide to their preparation (Vol. 15)**. Paris, Unesco Press, 1976. 78p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT, São Paulo – SP, “**Manual de Geotecnia. Taludes de Rodovias – Orientação Para diagnóstico e Soluções Para os seus Problemas**”, 1991 DER SP.

JIANG, X; MAHADEVAN, S. Bayesian cross-entropy methodology for optimal design of validation experiments. **Measurement Science And Technology**, v. 17, p. 1895-1908, 12 jun. 2006.

KIM, H, G *et al.* Estimating landslide susceptibility areas considering the uncertainty inherent in modeling methods. **Stochastic Environmental Research And Risk Assessment**, v. 32, p. 2987-3019, nov. 2018.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. 1ª. ed. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

LAMBE, T. W; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: J. Wile, 1969.

LEONI, B.; RADFORD, T.; SCHULMAN, M. Disaster through a different lens: behind every effect, there is a cause. Geneva: **United Nations**, 2011. 188 p.

LEPSCH, I, F. **Formação e conservação dos solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

LIMA, L, A, S. **Aplicação dos métodos semi-automático e lógica Fuzzy para o mapeamento de solos da Bacia do Sarandi**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LITTLE, W, C. THORNE, C, R. & MURPHY, J, B. Mass Bank Failure Analysis of Selected Basin Streams. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Vol. 25, No. 5, pp. 1321-1328, 1982.

LOHNES, R, A, & HANDY, R, L. Slope Angles in Friable Loess. **Journal of Geology**, Vol. 76, pp. 247-258, 1968a.

LUTENEGGER, A J. **In Situ Testing Methods in Geotechnical Engineering**. Massachusetts: Crc Press, 2021. 370 p.

MACHADO, W, P. **IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A OCORRÊNCIA DE ESCORREGAMENTOS NA BACIA DO RIO ITAJAÍ (SC) A PARTIR DE ÍNDICES DE COESÃO CRÍTICA CONSIDERANDO A VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA QUANTIDADE DE CHUVA**. 2018. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

MALAMUD, B, D; TURCOTTE, D, L; GUZZETTI, F; REICHENBACH, P. Landslide inventories and their statistical properties. **Earth Surface Processes And Landforms**, [S.L.], v. 29, n. 6, p. 687-711, jun. 2004. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1064>.

MEDEIROS, V, S. **Análise estatística de eventos críticos de precipitação relacionados a desastres naturais em diferentes regiões do brasil**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013, 207 p;

MELO, T, C. **EFEITO DA CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS NO MAPEAMENTO DAS ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A ESCORREGAMENTOS COM MODELO SHALSTAB**. 2018. 162p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre - RS, 2018.

MELO, C, *M et al.* The Relevance of Geotechnical-Unit Characterization for Landslide-Susceptibility Mapping with SHALSTAB. **Geohazards**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 383-397, 30 nov. 2021.

MESQUITA, M.G.B. & MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MIRANDA, C, M. **Mapeamento das unidades geotécnicas e desenvolvimento de um Sistema de Informações Geográficas para área de abrangência da Rodovia BR-101/RS**. 2008. 148 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil., Porto Alegre - RS, 2008.

MICHEL, G. P; KOBİYAMA, M; GOERL, R. F. Análise comparativa entre os modelos Shalstab e Sinmap na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais. **Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos: artigos selecionados**. Porto Alegre: ABRH, p. 209-225, 2012.

MICHEL, G. P. **MODELAGEM DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS COM CONSIDERAÇÃO DO EFEITO DA VEGETAÇÃO**. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MICHEL, G. P. **ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DO SOLO E SEU EFEITO NA MODELAGEM DE ESCORREGAMENTOS**. 2015. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MICHEL, G. P, *et al.* Efeitos da vegetação na modelagem de estabilidade de encostas na bacia hidrográfica do rio Cunha, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 825-846, 19 set. 2021. Revista Brasileira de Geomorfologia. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i4.2008>.

MICHEL, G. P; SCHWARZ, H; ABATTI, B. H; PAUL, L. R; SILVA, M. A; ZANANDREA, F; SALVADOR, C. G; CENSI, G; BIEHL, A; KOBİYAMA, M. Relatório técnico dos desastres de dezembro de 2020 nos municípios de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul SC. Volume I. Porto Alegre: GPDEN/IPH/UFRGS, 2021. 53 p.

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

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A.. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 57, n. 2, p. 443 - 452, mar, 1993. Wiley.

MONTOYA, C, A, H. **INCERTEZAS, VULNERABILIDADE E AVALIAÇÃO DE RISCO DEVIDO A DESLIZAMENTO EM ESTRADAS**. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso Geotecnia, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MÜHLETHALE, B *et al.* Avaliação do uso da morfometria como suporte para a elaboração de mapa pedológico na bacia do Ribeirão da Pedreira - DF. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, v. 12, n. , p. 3167-3174, abr. 2005.

MÜLLER, V. S. Avaliação da influência de um protocolo para obtenção de dados de resistência ao cisalhamento com aplicação em mapas geotécnicos. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2015.

NAKAZAWA, V. A., et al. Cartografia geotécnica: a aplicação como pressuposto. In: **Simpósio de geologia do sudeste**, 1991, 2. **Anais**, 1991. p.329-336.

OLIVEIRA, L, C, D, de. **ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCO DE MOVIMENTOS DE MASSA COM EMPREGO DE ESTATÍSTICA BAYESIANA**. 540 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. *Water Resources Research*, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.

ORLANDINI, R. **UNIDADES GEOTÉCNICAS DOS MUNICÍPIOS DE NOVO HAMBURGO E CAMPO BOM/RS E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE PERFIS TÍPICOS DE SOLOS DE ARENITO.** 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

PEDRON, F, A, *et al.* CONDUTIVIDADE E RETENÇÃO DE ÁGUA EM NEOSSOLOS E SAPROLITOS DERIVADOS DE ARENITO. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [SI], v. 35, p. 1253-1262, maio 2011.

PEREIRA, A. **RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS NÃO SATURADOS: ANÁLISE EXPERIMENTAL E TEÓRICA.** 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PEREIRA, R, M, R. **Análise probabilística da segurança ao deslizamento de barragens gravidade de betão.** 2011. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Perfil Estruturas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

PINHEIRO, R, J, B. **Estudo do comportamento geomecânico de perfis oriundos de rochas sedimentares da formação Rosário do Sul.** 1991. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

PINHEIRO, R, J, B; DAVISON DIAS, R. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DA FORMAÇÃO ROSÁRIO DO SUL NA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE. *Rev. Ig. São Paulo*, Volume Especial, p. 77-83, 1995.

PINHEIRO, R, J, B; NUMMER, A, V; RAUBER, A, C. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DAS PRINCIPAIS UNIDADES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DE SANTA MARIA – RS. *Geociências*, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 347-363, 2017.

PINTO, C. D. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3ª. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2006. 363 p.

PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Classificação dos movimentos de massa ocorridos em março de 2011 na Serra da Prata, Estado do Paraná. Geoinf.: **Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia**, v. 4, n. 1, p. 3-27, 2012.

PORTO, E. Z. Estudo de estabilidade de uma encosta em Faxinal do Soturno-RS. 153f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

POURGHASEMI, H, R; MOHAMMADY, M; PRADHAN, B. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: safarood basin, iran. *Catena*, [s.l.], v. 97, p. 71-84, out. 2012.

POZZOBON, M. Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau/SC: uma abordagem probabilística através da aplicação da técnica pesos de evidência. 2013. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Ciências Agrárias, Ufpr, Curitiba, 2013.

PRADHAN, A, M, S; KIM, Y, T. Application and comparison of shallow landslide susceptibility models in weathered granite soil under extreme rainfall events. **Environmental Earth Sciences**, [S.L.], v. 73, n. 9, p. 5761-5771, 6 nov. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3829-x>.

PRANDINI, F.L.; NAKAZAWA, V.A.; FREITAS, C.G.; et al. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. In: BITAR, O.Y. **Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: ABGE/IPT, 1995. P.187-202.

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L. GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente ArcView, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na Região do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1. p. 49-67, 2002.

REGINATTO, G. M. P. **Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros-SC, com ênfase em escorregamentos translacionais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2013.

REGINATTO, G, M, P *et al.* Influence of DEM spatial resolution on the susceptibility mapping with SHALSTAB in the Rio Garcia hydrographic basin, municipality of Blumenau/SC. **Brazilian Applied Science Review**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 1475-1491, 8 jun. 2021.

REMONDO, Juan *et al.* Validation of Landslide Susceptibility Maps; Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. **Natural Hazards**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 437-449, nov. 2003. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/b:nhaz.0000007201.80743.fc>.

RIFFEL, E. S. **METODOLOGIAS PARA MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA**. 2017. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RUENKRAIRERGSA, T. & PIMSARN, T. Deep Hole Lime Stabilization for Unstable Clay Shale Embankment. **Proceedings of the 7th Southeast Asian Geotechnical Conference**, pp. 631-645, 1982.

SAKAMOTO, M, Y; GUESSER, L, H; OLIVEIRA, M, C, G; CONTESSI, R, J; ABREU, R, P.; HIGASHI, R, A, R. Uso do método Borehole Shear Test no mapeamento geotécnico de áreas de risco. **XV Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**. Bento Gonçalves - RS. 2015.

SANEJOUAND, R. 1972. La cartographie geotechnique em France. Lab. Central Ponts et Chauss,s – ARMINES, [Paris]., 1972

SANTOS, A, R. **Manual básico para a elaboração e para o uso da carta Geotécnica**. São Paulo: Rudder, 2014. 103 p.

SBROGLIA, R. M; HIGASHI, A, R, A. Mapeamento geotécnico preliminar de áreas suscetíveis a movimentos de massa na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR**, p. 834-846, 2013.

SBROGLIA, R. M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. 2015. 187 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Florianópolis, 2015.

SBROGLIA, R. M. et al. Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis.XII. **Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas COBRAE 2017**. v.1, n. 2594-9217-2017, p. 8, 2017.

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. 15, n. 10, p. 2093-2106, 16 ago. 2018.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v. 251, n. 3-4, p. 163-176, 2001. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00466-8.

SHEPHERD, R.G. Correlations of Permeability and Grain Size. *Groundwater*, v. 5, n. 27, p. 633-638, 1989.

SHIMIZU, S, H; VIEIRA, P, C; MOSER, José Marcos. **PROJETO GERENCIAMENTO COSTEIRO - GERCO (3ª FASE)**. Florianópolis: Ibge, 2003. 703 p.

SHIRANI, K; PASANDI, M; ARABAMERI, A. Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran. **Natural Hazards**, [s.l.], v. 93, n. 3, p. 1379-1418, 21 maio 2018.

SILVA, I, C, O; ALVES, R, E; RODRIGUES, T, L. ANÁLISE DE VARIÁVEIS MORFOMÉTRICAS EXTRAÍDAS A PARTIR DE IMAGEM SRTM PARA ELABORAÇÃO DE MAPA PEDOLÓGICO. **Geoambiente On-Line**, Jataí, n.20, p. 137-151, jun. 2013.

SILVA, A. J. N; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 853-862, 2007.

SILVEIRA, R, M. **Comportamento Geotécnico das Encostas**. Paraná: Crea, 2016. 62 p. Disponível em: www.crea-pr.org.br. Acesso em: 04 abr. 2022.

SISTO, F, P. **COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS SHALSTAB E SINMAP NO ESTUDO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A ESCORREGAMENTOS EM SÃO SEBASTIÃO - SP**. 2018. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2018.

SORBINO, G; SICA, C; CASCINI, L; CUOMO, S. ON THE FORECASTING OF FLOWSLIDES TRIGGERING AREAS USING PHYSICALLY BASED MODELS. In: 1ST NORTH AMERICAN LANDSLIDE CONFERENCE, 1., 2007, Vail. **North American**

Conference on Landslides. Vail: Association Of Environmental & Engineering Geologists, 2007. p. 305-315.

SOUZA, C, S. O PAPEL DO ZONEAMENTO AMBIENTAL NO PLANEJAMENTO MUNICIPAL. **Pidcc**, Aracaju, v. , n. , p. 154-175, out. 2013.

SOUSA, D, J, S, C. **Aterros Estruturais de Barragens. Uma Contribuição para o seu Dimensionamento Hidráulico.** 2013. 255 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2013.

SPECHT, L, P. Comportamento de Misturas Solo-Cimento-Fibra Submetidas a Carregamentos Estáticos e Dinâmicos Visando a Pavimentação. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

STRAUCH, Ronda *et al.* A hydroclimatological approach to predicting regional landslide probability using Landlab. **Earth Surface Dynamics**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 49-75, 7 fev. 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/esurf-6-49-2018>.

TEBBENS, S. F. Landslide Scaling: a review. **Earth And Space Science**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-12, jan. 2020. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2019ea000662>.

TERZAGHI, K. V; PECK, R. B; MESRI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** 3^a. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1996. 592 p.

THIESEN, S. **APLICAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÃO A PARTIR DE ENSAIOS SPT: UM ESTUDO DE CASO EM BLUMENAU/SC.** 2016. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Ppgec, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

TICE, J, A. & SAMS, C, E. Experiences with Landslide Instrumentation in the Southeast. **Transportation Research Record**, No. 482, pp. 18-29, 1974.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP.** 2007. 240 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo, SP, 2007.

TRENTIN, R; ROBAINA, L, E, S. METODOLOGIA PARA MAPEAMENTO GEOAMBIENTAL NO OESTE DO RIO GRANDE DO SUL. **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, São Paulo, v. 11, n. , p. 3606-3615, set. 2005.

VALENTE, A. L. S. **Integração de dados por meio de geoprocessamento, para a elaboração de mapas geotécnicos, análise do meio físico e suas interações com a mancha urbana: o caso de Porto Alegre (RS).** 1999. 373 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, São Paulo, SP, 1999.

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

VIEIRA, R. **Um olhar sobre a paisagem e o lugar como expressão do comportamento frente ao risco de deslizamento.** 2004. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

VIEIRA, R.; FURTADO, S. M. de A. Percepções frente ao risco de deslizamento. **Geosul**, Florianópolis, v. 40, n. 20, p. 55-75, 01 jan. 2005.

WANG, Q; LI, W; WU, Y; PEI, Y; XIE, P. Application of statistical index and index of entropy methods to landslide susceptibility assessment in Gongliu (Xinjiang, China). **Environmental Earth Sciences**, [S.L.], v. 75, n. 7, p. 2-13, 30 mar. 2016.

YANG, H. WHITE, D, J, & SCHAEFER, V, R. In-Situ Borehole Shear Test and Rock Borehole Shear Test for Slope Investigations. **GeoShanghai 2006 Site and Materials Characterization**, ASCE, 2006.

ZANON, G. Movimentos de massa nas encostas do Rio Soturno às margens da RS-149-Faxinal do Soturno, RS. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2021.

ZHANG, W; MONTGOMERY, D, R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resour. Res.** v. 30, n. 4, p. 1019–1028, abr 1994.

ZHANG, Y; SCHAAP, M, G. Weighted Recalibration of the Rosetta Pedotransfer Model with Improved Estimates of Hydraulic Parameter Distributions and Summary Statistics (Rosetta3). **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 547, p. 39-53, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.004>.

ZIEGLER, G, L, F. **AVALIAÇÃO DO RISCO A ESCORREGAMENTOS DEVIDO A OCUPAÇÃO URBANA NA VILA BELA VISTA EM SANTA MARIA - RS**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

ZIMMERMANN, D. M. **Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e Rio da Prata -Joinville/SC**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

ZIZIOLI, D; MEISINA, C; VALENTINO, R; MONTRASIO, L. Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, northern Italy. **Natural Hazards And Earth System Sciences**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 559-573, 5 mar. 2013.

ZUQUETTE, L. V. **A importância do mapeamento geotécnico no uso e na ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. 1993. 369p. Tese de Livre Docência, – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.