



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Regiane Mara Sbroglia

**Análise da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento
de áreas suscetíveis a deslizamentos**

Florianópolis

2022

Regiane Mara Sbroglia

Análise da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de doutora em Geografia
Orientador: Prof. Dr. Edison Ramos Tomazzoli
Coorientador: Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
por meio do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sbroglia, Regiane Mara

Análise da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos / Regiane Mara Sbroglia ; orientador, Edison Ramos Tomazzoli, coorientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi, 2022.

378 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. Parâmetros de resistência ao cisalhamento. 3. Borehole Shear Test. 4. Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos. 5. SHALSTAB. I. Tomazzoli, Edison Ramos . II. Higashi, Rafael Augusto dos Reis . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geografia. IV. Título.

Regiane Mara Sbroglia

Análise da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos

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

Prof. Daniel Galvão Veronez Parizoto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Juan Antônio Altamirano Flores, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Renato Fontes Guimarães, Dr.
Universidade de Brasília

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutora em Geografia.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Edison Ramos Tomazzoli, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022.

Este trabalho é dedicado ao professor Joel Robert Georges Marcel Pellerin (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo amor, paciência e apoio, sobretudo no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu orientador, professor doutor Edison Ramos Tomazzoli, que desde o mestrado aceitou ser meu orientador, sempre repassando seus ensinamentos e disponível para sanar as dúvidas que surgiram ao longo desses anos.

Ao meu coorientador, professor doutor Rafael Augusto dos Reis Higashi, por ter me recebido tão bem, por toda a compreensão, incentivo, ensinamentos e, principalmente, todo o apoio nesses onze anos de trabalho em conjunto. Também o agradeço pelas conversas que tivemos em momentos difíceis e decisivos.

Aos professores que aceitaram fazer parte da banca de defesa desta tese, doutores Renato Fontes Guimarães, Juan Antônio Altamirano Flores e Daniel Galvão Veronez Parizoto, e contribuírem para o resultado final. Também agradeço aos membros suplentes, professoras doutoras Edna Lindaura Luiz e Janete Josina de Abreu, por aceitarem meu convite.

À Pró-Reitoria de Pós-Graduação (PROPG) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro no primeiro ano do doutorado.

Ao Laboratório de Mapeamento Geotécnico e ao professor doutor Orlando Martini de Oliveira pelo empréstimo do equipamento *Borehole Shear Test* - BST, e ao Laboratório de Mecânica dos Solos, da UFSC, por disponibilizar o espaço para a realização dos ensaios BST, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial.

Aos colegas de laboratório e projetos de extensão: Miryan Sakamoto, Caroline Christ, Luiz Guesser, Bianca Schvartz, Vicente Mafra, Manolo Caraméz, Gabriel Bellina, Graziela Bini, Drielly Nau, Gerly Sanchez, Matheus Klein, Vitor Müller, Murilo Espíndola, ...

Aos meus amigos, Gisele Reginatto e Ademir Degering, por todo o apoio no desenvolvimento desta pesquisa e parceria nos campos e na execução dos ensaios BST.

À Ana por todo apoio, incentivo e compreensão - desde a preparação para o processo seletivo de doutorado à defesa, e por estar presente em todos os momentos.

Aos meus amigos por compreenderem minha ausência.

A todos que, quando solicitados, gentilmente forneceram informações, seus trabalhos e dados de campo, os quais fizeram parte do levantamento bibliográfico e, sobretudo, compuseram o banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.

Agradeço, por fim, a todos aqueles que, embora não tenham sido aqui mencionados, de alguma forma me auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Essa pesquisa tem como objetivo principal analisar a influência da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos com o uso de modelagem matemática. A hipótese é que o uso de unidades geotécnicas, para a coleta de dados e na parametrização, é a forma mais eficiente, ou seja, de maior capacidade preditiva de novos deslizamentos, à escala de bacia hidrográfica. O desenvolvimento da pesquisa foi conduzido em cinco etapas. Na primeira, analisando os parâmetros morfológicos das encostas observou-se que, embora os mapas com resolução espacial de 1m apresentem maior detalhamento das feições, ocorreram alterações no formato das curvas de nível no interior das cicatrizes, com variação mais evidente na declividade, área de contribuição e na forma das encostas após o desastre natural de novembro de 2008. A próxima etapa consistiu na validação em laboratório do *Borehole Shear Test* (BST) em relação aos ensaios de Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial. De acordo com os dados obtidos, foi possível constatar que as envoltórias de ruptura dos corpos de prova com características geotécnicas idênticas e ensaiados sob as mesmas condições de drenagem e tensão normal apresentaram correlações consideradas satisfatórias e valores semelhantes dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Na terceira etapa, foram realizadas saídas de campo nas quais foram executados 20 ensaios BST distribuídos espacialmente pela bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, e elaborado um banco de dados georreferenciado de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos em 37 pontos. Na quarta etapa, utilizando o referido banco de dados, foram elaborados 15 cenários de espacialização dos parâmetros, além da espacialização da profundidade de ruptura do solo. A última etapa consistiu nas modelagens de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais utilizando o modelo matemático *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB), totalizando 210, 105 de cada resolução espacial (1m e 10m). Em todas as modelagens observou-se que o desempenho do SHALSTAB reduziu nas de menor escala. A validação das modelagens foi com base nas 526 superfícies de ruptura estimadas nas cicatrizes de deslizamentos translacionais por meio da elaboração das curvas de predição e da determinação da respectiva Área Abaixo da Curva (AAC). Ainda, foi realizada a comparação entre os cenários de maior capacidade preditiva por meio dos Índices de Acerto (IA) e de Erro (IE) e a taxa IA/IE. A modelagem que melhor se ajustou às cicatrizes dos deslizamentos que ocorreram em novembro de 2008 foi sem a espacialização dos parâmetros geotécnicos, por meio da média ponderada utilizando a área das unidades geotécnicas, com *pixel* de 1m. Por fim, elaborou-se o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais por meio da classificação semafórica do cenário com maior capacidade preditiva, $C z = 5m$ (*pixel* de 1m). A classe de alta suscetibilidade (vermelho) abrangeu 8% da bacia e apresentou 86% das superfícies de rupturas, a classe de média suscetibilidade (amarelo) localizou-se em 37% da área e apresentou 12% das cicatrizes e a classe de baixa suscetibilidade (verde) abrangeu 55% da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú contendo 2% das superfícies de ruptura. Destaca-se que, na utilização desse mapa, com vistas ao ordenamento territorial em relação aos desastres naturais, nas áreas de cada classe há uma progressiva redução da probabilidade de ocorrer deslizamentos, de 86%, 12% e 2% respectivamente, em um futuro indeterminado.

Palavras-chave: Parâmetros de resistência ao cisalhamento. *Borehole Shear Test*. Mapeamento de áreas suscetíveis. Deslizamentos. SHALSTAB.

ABSTRACT

The main goal of this research is to analyze the influence of the spatial distribution of the soil shear strength on the mapping of susceptibility to translational landslides using mathematical modelling. The hypothesis is that the use of geotechnical units to collect data and in their spatial distribution is the most efficient way, that is, with highest predictive capacity for future landslides, when using the watershed scale. This research was carried out in five stages. In the first one, analyzing the hillslopes morphological parameters it was observed that, although the 1-m resolution maps show features in greater detail, the shape of the elevation contours has changed inside the scars. The slope angle, contributing area and slope shape after the November 2008 natural disaster showed the biggest variation. The next stage was the Borehole Shear Test (BST) validation in laboratory compared to the direct shear and triaxial tests. According to obtained data, it was possible to find that the failure envelopes of the test bodies with identical geotechnical characteristics and same drainage and normal stress conditions, showed satisfactory correlations and similar results of shear strength parameters. In the third stage, 20 Borehole Shear Tests were performed spatially distributed in entire Ribeirão Baú basin, and a georeferenced database of soil shear strength parameters at 37 points was developed. In the fourth stage, 15 scenarios with data spatialization were generated. Also, scenarios were generated from the spatialization of the soil rupture depth. The last stage was the modeling of susceptible areas to translational landslides using Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB), 210 scenarios were obtained (105 of each spatial resolution, 1-m and 10-m). SHALSTAB performed worse in the 1-m grid scenarios. The modellings validation was performed using the 526 rupture surfaces estimated in the translational landslide scars, for that Prediction Curves were generated and the Area Under the Curve (AUC) were calculated. Also, a comparison was made between the scenarios with the highest predictive capacity through the Success (IA) and Error Indexes (IE) and the IA/IE rate. According to the validation results, the scenario with weighted average of the soil data using geotechnical units, with 1-m grid, presented the best fit with the November 2008 scars. Finally, the susceptibility to translational landslides map of the Ribeirão Baú basin was generated with three classes using the highest landslides predictive capacity scenario, $C_z = 5\text{m}$ (1-m grid). In the generated map the high susceptibility class (red color) covered 8% of the basin and 86% of rupture surfaces occurred in this class, the middle susceptibility class (yellow color) was located at 37% of the study area and 12% of landslide scars occurred in this class, the low susceptibility class (green color) is present on 55% of the Ribeirão Baú basin with 2% of the rupture surfaces. When using this map to plan the occupation of slopes, the probability of landslides occurring in these classes progressively reduces 86%, 12% and 2%, respectively, in an indeterminate future.

Keywords: Soil shear strength parameters. Borehole Shear Test. Mapping of susceptible areas. Landslides. SHALSTAB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Situação decretada nos municípios de Santa Catarina até o dia 8 de dezembro de 2008, após o desastre natural de novembro de 2008.	25
Figura 2 - Esforços atuantes no contato entre os grãos e definição das tensões.....	35
Figura 3 - Decomposição da tensão em um plano genérico.	36
Figura 4 - Componentes de tensão.	36
Figura 5 - Estados de tensões.	38
Figura 6 - a) Representação do critério de Mohr, sendo o círculo B representativo de um estado de tensões em que não há ruptura e o círculo A, tangente à envoltória de Mohr, indicativo de um estado de tensões na ruptura. b) Representação do critério de Coulomb, a reta representa a equação $\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$	39
Figura 7 - Envoltória de ruptura para areias fofas e compactas.	42
Figura 8 - Comportamento típico de areias e argilas.	44
Figura 9 - Equipamento empregado no ensaio de Cisalhamento Direto.	46
Figura 10 - Ensaio de Cisalhamento Direto: a) montagem da caixa bipartida e corpo de prova; b) equipamento utilizado no ensaio; c) detalhe da aplicação da tensão cisalhante resultando no deslocamento da seção inferior da caixa bipartida; d) corpo de prova após a execução do ensaio.	46
Figura 11 - Representação do resultado típico do ensaio.	48
Figura 12 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para determinação de c e ϕ	49
Figura 13 - Equipamento padrão utilizado no ensaio de Compressão Triaxial.....	50
Figura 14 - Ensaio de Compressão Triaxial: a) equipamento; b) câmara; c) câmara preenchida com água e cisalhamento do corpo de prova; d) corpo de prova após a execução do ensaio. .	51
Figura 15 - Tensões nos corpos de prova.	52
Figura 16 - Equipamento utilizado no ensaio <i>Borehole Shear Test</i>	54
Figura 17 - Ensaio BST: a) trado pedológico; b) montagem do equipamento, modelo A103. .	55
Figura 18 - Coleta de amostras de solo em bloco indeformado em a) poço de inspeção e b) talude.	64
Figura 19 - Coleta de amostras de solo no molde do ensaio de Cisalhamento Direto em taludes.	65

Figura 20 - Equipamento BST e trado pedológico para execução do ensaio.	68
Figura 21 - Número de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos por município em Santa Catarina.	77
Figura 22 - Distribuição geográfica dos dados para o solo residual de granito e gnaiss.	85
Figura 23 - Classificação dos movimentos de massa.	88
Figura 24 - Representação: a) modelo de estabilidade de encosta infinita e b) modelo hidrológico de estado uniforme.	97
Figura 25 - Foto, a esquerda, de um deslizamento com fluxo de detritos de grandes proporções tirada logo após o desastre de novembro 2008, em dezembro de 2008, e foto, a direita, do mesmo deslizamento tirada quatro anos após, em agosto de 2012.	105
Figura 26 - Aspecto das curvas de nível (em verde) nas áreas de ocorrência de deslizamentos (em vermelho) na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	106
Figura 27 - Modelo de Curva ROC conforme Fawcett (2006).	108
Figura 28 - Modelo de Curva de sucesso ou predição conforme Chung e Fabbri (1999).	109
Figura 29 - Localização da bacia do Ribeirão Baú, Ilhota (SC).	111
Figura 30 - Geologia e feições geomorfológicas da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	112
Figura 31 - Mapa geológico do escudo catarinense.	113
Figura 32 - Lâminas delgadas de gnaiss, piroxenito e arenito (vista geral) - luz natural.	114
Figura 33 - Modelados de relevo na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	117
Figura 34 - Unidades geotécnicas na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	119
Figura 35 - Unidades geotécnicas por tipo de relevo na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	120
Figura 36 - Curvas granulométricas dos solos das unidades geotécnicas e diagrama triangular.	123
Figura 37 - Gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> tensão normal dos ensaios de Cisalhamento Direto na condição consolidada drenada.	125
Figura 38 - Diagrama de atividades da pesquisa.	127
Figura 39 - Produtos cartográficos utilizados na revisão do inventário de cicatrizes: a) relevo sombreado (azimute 315° e altura 45°); b) Imagem sensor HRC do CBERS; c) Imagem sensor AVNIR-2 do ALOS (R4, G3, B1); d) Imagem de satélite disponível em <i>Google Earth Pro</i> ,	

datada de 21/05/2009; e) Imagem de satélite <i>Google Earth Pro</i> , de 27/03/2013; f) Foto aérea, após o desastre, fornecida por Joel Pellerin.....	129
Figura 40 - Imagens ilustrativas das divergências entre os polígonos das cicatrizes de deslizamentos mapeadas por Tomazzoli <i>et al.</i> (2012) - em vermelho - e a revisão do inventário de cicatrizes - em amarelo (escala 1:8.000), sobrepostas a: a) relevo sombreado (azimute 315° e altura 45°); b) Imagem sensor AVNIR-2 do ALOS (composição de cores R-4, G-3, B-1); c) Imagem sensor HRC do CBERS.....	130
Figura 41 - Teste tátil-visual em amostras com diferentes proporções de areia fina, cal e água.	134
Figura 42 - Corpos de prova utilizados nos ensaios: a) BST; b) Compressão Triaxial; e c) CD.	135
Figura 43 - Execução do ensaio BST em laboratório.....	137
Figura 44 - Execução do ensaio de Cisalhamento Direto.....	138
Figura 45 - Execução do ensaio de Compressão Triaxial.	139
Figura 46 - Círculos de Mohr e trajetória de tensões do ensaio de Compressão Triaxial.	140
Figura 47 - Realização do furo com trado pedológico (a) e inundação para a realização do ensaio (b).	142
Figura 48 - Motangem do equipamento (a) e execução do ensaio BST na área de estudo (b).	143
Figura 49 - Limpeza das placas de cisalhamento (a) e elaboração do gráfico $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ (b).....	144
Figura 50 - Mapa geotécnico com a localização dos ensaios ou da coleta do corpo de prova para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.....	145
Figura 51 - Espacialização dos dados de intercepto coesivo a partir de três modelos de semivariograma, por meio de krigagem ordinária.....	146
Figura 52 - Reclassificação dos intervalos definidos por Thuiller <i>et al.</i> (2010) com base no valor de AAC máximo.....	152
Figura 53 - Definição das áreas utilizadas no cálculo dos Índices de Acerto e Erro.....	153
Figura 54 - Definição dos valores de VP, FP, FN e VN.	154
Figura 55 - Cicatrizes de deslizamentos mapeadas na área de estudo com o auxílio de imagens de satélite (<i>software Google Earth</i> , visualização do relevo em 3D, fator de ampliação 1,5). 157	

Figura 56 - Relevo sombreado obtido a partir do MDE (<i>pixel</i> 10m), com as superfícies de ruptura.....	158
Figura 57 - Relevo sombreado obtido a partir do MDE (<i>pixel</i> 1m), com as superfícies de ruptura.	158
Figura 58 - MDE classificado em intervalos de altitudes da bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 10m).	159
Figura 59 - MDE classificado em intervalos de altitudes da bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 1m).	160
Figura 60 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à altitude nas encostas (resolução espacial 10m).	160
Figura 61 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à altitude nas encostas (resolução espacial 1m).	161
Figura 62 - Mapa de declividade das encostas na bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 10m).	164
Figura 63 - Mapa de declividade das encostas na bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 1m).	164
Figura 64 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação às declividades das encostas (resolução espacial 10m).	165
Figura 65 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação às declividades das encostas (resolução espacial 1m).	165
Figura 66 - Mapa de orientação das encostas na bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 10m).	167
Figura 67 - Mapa de orientação das encostas na bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 1m).	168
Figura 68 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à orientação das encostas (resolução espacial 10m).	169
Figura 69 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à orientação das encostas (resolução espacial 1m).	169
Figura 70 - Total acumulado de precipitação em mm entre os dias 21 e 25 de novembro de 2008 na bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu.	170
Figura 71 - Formas das encostas e o escoamento superficial em cada uma delas.	171
Figura 72 - Mapa das formas das encostas na bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 10m).	171
Figura 73 - Mapa das formas das encostas na bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 1m).	172
Figura 74 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à forma das encostas (resolução espacial 10m).	172

Figura 75 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à forma das encostas (resolução espacial 1m).....	174
Figura 76 - Mapa da área de contribuição nas encostas da bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 10m).	176
Figura 77 - Mapa da área de contribuição nas encostas da bacia do Ribeirão Baú (<i>pixel</i> 1m).	176
Figura 78 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à área de contribuição nas encostas (resolução espacial 10m).....	177
Figura 79 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à área de contribuição nas encostas (resolução espacial 1m).....	177
Figura 80 - Cicatrizes de deslizamentos nas resoluções espaciais de 10 e 1m.....	182
Figura 81 - Cicatrizes de deslizamentos nas resoluções espaciais de 10 e 1m.....	182
Figura 82 - Curva granulométrica do solo dos corpos de prova.....	184
Figura 83 - Gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> tensão normal dos ensaios BST e CD - condição consolidada drenada.	187
Figura 84 - Gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> tensão normal para o ensaio de Compressão Triaxial - condição consolidada drenada.	188
Figura 85 - Superfícies de ruptura traçadas para um talude retilíneo seco (a esquerda) e saturado (a direita) e o valor do Fator de Segurança.....	190
Figura 86 - Localização dos ensaios BST na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	194
Figura 87 - Execução dos ensaios BST durante as saídas de campo na área de estudo.....	195
Figura 88 - Gráfico de tensão cisalhante <i>versus</i> tensão normal dos ensaios BST em campo.	198
Figura 89 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Ca.....	198
Figura 90 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cc.....	199
Figura 91 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cde.....	199
Figura 92 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cf.	199
Figura 93 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cpi.	200
Figura 94 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cgn.	200
Figura 95 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos nos ensaios BST em campo, para cada ponto na unidade geotécnica.....	202

Figura 96 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos nos ensaios BST em campo, por unidade geotécnica e modelado de relevo.	204
Figura 97 - Localização dos pontos de ensaios BST (ícone redondo), de coleta do corpo de prova para ensaios CD (ícone quadrado) e ambos (ícone triangular), para obtenção dos parâmetros de resistência.	205
Figura 98 - Cenários de espacialização dos valores de intercepto coesivo do banco de dados.	212
Figura 99 - Cenários de espacialização dos valores de ângulo de atrito do banco de dados.	214
Figura 100 - MDE hidrologicamente consistidos, com resolução de 1 e 10m, da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	217
Figura 101 - Cenários com espacialização dos dados de profundidade de ruptura do solo para resolução espacial de 1 e 10m.	220
Figura 102 - Gráficos com a distribuição da profundidade de ruptura do solo nos cenários zE, zD e zM, para resolução espacial de 1 e 10m.	221
Figura 103 - Gráficos com a área de cada classe de estabilidade do SHALSTAB [%] nas modelagens.	222
Figura 104 - Gráficos com a área das superfícies de ruptura cada classe de estabilidade do SHALSTAB [%] nas modelagens.	225
Figura 105 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú nas resoluções espaciais de 1 e 10m, cenário denominado O, para a profundidade de ruptura do solo $z = D$	229
Figura 106 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, cenário denominado M, resolução espacial de 1m.	231
Figura 107 - Variação da área das classes extremas de estabilidade nos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo (z), resolução espacial 1m.	232
Figura 108 - Variação da área das classes extremas de estabilidade nos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo (z), resolução espacial 10m.	232
Figura 109 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, cenários denominados E e F, para a profundidade de ruptura do solo $z = 5m$ e resolução espacial 1m.	234

Figura 110 - Curvas de predição das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	235
Figura 111 - Variação dos valores de AAC nas modelagens para a resolução espacial de 1m e de 10m.	239
Figura 112 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú com maiores valores de IA/IE.	247
Figura 113 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamentos com a média ponderada dos dados obtidos pelo ensaio de <i>Borehole Shear Test</i> -BST e Cisalhamento Direto - CD (resolução espacial 1m).	250
Figura 114 - Curvas de predição das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	252
Figura 115 - Curvas de predição das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para diferentes autores, utilizando o SHALSTAB.	253
Figura 116 - Curva de predição da modelagem C z = 5m (1m) dividida em 3 classes.	255
Figura 117 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais semaforico da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.	256

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores indicados para incremento de tensão normal entre estágios.	55
Quadro 2 - Classificação dos movimentos de massa segundo distintos autores.	86
Quadro 3 - Características dos deslizamentos rotacionais e translacionais.	90
Quadro 4 - Fatores condicionantes e sua importância relativamente aos métodos de análise suscetibilidade a movimentos de massa.	91
Quadro 5 - Nível de segurança desejado contra perdas de vidas humanas, danos materiais e ambientais.	93
Quadro 6 - Fatores de Segurança mínimos conforme ABNT NBR 11.682/2009.	94
Quadro 7 - Definição das classes extremas do modelo matemático SHALSTAB.	99
Quadro 8 - Tabela de Contingência para validação dos cenários, sendo: VP - verdadeiro positivo, FP - falso positivo, FN - falso negativo e VN - verdadeiro negativo.	107
Quadro 9 - Limites para a classificação das modelagens por meio dos valores de AAC para diferentes autores.	110
Quadro 10 - Características gerais das unidades geotécnicas.	118
Quadro 11 - Classificação dos solos das unidades geotécnicas.	122
Quadro 12 - Ferramentas do <i>software</i> de geoprocessamento utilizadas para elaboração dos mapas morfológicos.	131
Quadro 13 - Ferramenta do <i>software</i> de geoprocessamento utilizada para interpolação dos dados.	146
Quadro 14 - Ferramentas do <i>software</i> de geoprocessamento utilizadas para obtenção dos parâmetros topográficos.	147
Quadro 15 - Cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos.	148
Quadro 16 - Ferramenta do <i>software</i> de geoprocessamento para álgebra de mapas.	149
Quadro 17 - Classes de estabilidade geradas pela modelo SHALSTAB em função de $\text{Log}(q/T)$	150
Quadro 18 - Cálculo das estatísticas de precisão derivadas da Matriz de Confusão.	154
Quadro 19 - Ferramenta do <i>software</i> de geoprocessamento utilizada para a validação.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos que utilizaram o BST para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.	61
Tabela 2 - Tempo genericamente estimado de execução para as etapas de cada um dos ensaios.	66
Tabela 3 - Comparação entre os resultados de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e <i>Borehole Shear Test</i> (BST).	73
Tabela 4 - Comparação entre os resultados de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Compressão Triaxial e <i>Borehole Shear Test</i> (BST).	74
Tabela 5 - Variação (V) entre resultados de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e <i>Borehole Shear Test</i> (BST) em trabalhos realizados no Brasil. .	75
Tabela 6 - Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nos municípios da zona costeira de Santa Catarina.	78
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização física.	121
Tabela 8 - Parâmetros de resistência obtidos no ensaio de Cisalhamento Direto.	125
Tabela 9 - Classificação dos mapas morfológicos.	132
Tabela 10 - Resultado da análise dos parâmetros morfológicos nas cicatrizes (<i>pixel</i> 10 e 1m).	179
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do solo dos corpos de prova.	185
Tabela 12 - Tensões normal e cisalhante nos ensaios.	187
Tabela 13 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos do corpo de prova obtidos pelos ensaios de <i>Borehole Shear Test</i> , Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial.	188
Tabela 14 - Valores de Fator de Segurança calculado com os parâmetros obtidos pelos ensaios de <i>Borehole Shear Test</i> , Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial.	191
Tabela 15 - Informações relativas aos ensaios: número de identificação, unidade geotécnica, coordenadas UTM, altitude, relevo e data do ensaio.	195
Tabela 16 - Informações relativas aos ensaios: profundidade de execução, tensão normal (σ), tempo de consolidação e tensão cisalhante (τ) em cada estágio.	197
Tabela 17 - Informações relativas aos ensaios: condição, equação e coeficiente de determinação (r^2) da reta, valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.	201

Tabela 18 - Banco de dados georreferenciado dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.....	206
Tabela 19 - Variação (V) entre a média dos valores dos parâmetros de intercepto de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e <i>Borehole Shear Test</i> (BST) do banco de dados da bacia hidrográfica (BH).....	208
Tabela 20 - Média dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada cenário de espacialização dos dados (mapa geotécnico e de modelados de relevo).	210
Tabela 21 - Média dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada cenário de espacialização dos dados (altitude, declividade, orientação e forma das encostas).	211
Tabela 22 - Valores dos parâmetros geotécnicos utilizados nos cenários para a modelagem com o SHALSTAB.	218
Tabela 23 - Valores do parâmetro de espessura de ruptura do solo utilizado nos cenários para a modelagem com o SHALSTAB.	219
Tabela 24 - Modelagens com valor de AAC localizadas nas 5 primeiras e 5 últimas posições da hierarquização – Apêndice E.	242
Tabela 25 - Modelagens com valor de AAC localizadas nas 10 primeiras e 10 últimas posições da hierarquização – Apêndice E.	243
Tabela 26 - Classificação das modelagens a partir dos valores de Área Abaixo da Curva (AAC).	244
Tabela 27 - Valores de IA, IE e IA/IE para as modelagens com maior capacidade preditiva.	244
Tabela 28 - Matriz de Confusão e estatísticas de precisão das modelagens com os maiores valores de IA/IE.....	245
Tabela 29 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizados nos cenários. ...	250
Tabela 30 - Resultados das modelagens com a média ponderada dos dados obtidos pelo ensaio de <i>Borehole Shear Test</i> - BST e Cisalhamento Direto - CD (resolução espacial 1m).	251
Tabela 31 - Resultados das modelagens obtidos para o cenário C $z=5m$ (1m) e para o cenário B em Sbroglia <i>et al.</i> (2018b).	254
Tabela 32 - Análise dos parâmetros morfológicos nas classes de suscetibilidade a deslizamentos.	257

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	OBJETIVO GERAL.....	27
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
1.3	JUSTIFICATIVA.....	28
1.3.1	Aspectos de Ineditismo.....	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	33
2.1	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS	33
2.1.1	Solo	33
2.1.2	Tensões no Solo	34
2.1.3	Círculos de Mohr	37
2.1.4	Critério de ruptura de Mohr-Coulomb	38
2.1.5	Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.....	40
2.1.5.1	<i>Coesão</i>	40
2.1.5.2	<i>Ângulo de atrito</i>	41
2.1.5.3	<i>Fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento</i>	42
2.1.6	Ensaio geotécnicos para obtenção dos parâmetros de resistência	45
2.1.6.1	<i>Ensaio de Cisalhamento Direto.....</i>	45
2.1.6.2	<i>Ensaio de Compressão Triaxial</i>	49
2.1.6.3	<i>Borehole Shear Test</i>	53
2.1.6.3.1	<i>Uso do Borehole Shear Test no Brasil.....</i>	57
2.1.7	Comparação entre os métodos de execução dos ensaios de Cisalhamento Direto, Compressão Triaxial e Borehole Shear Test.....	64
2.1.8	Estudos comparativos entre os ensaios de Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial com o Borehole Shear Test	71

2.1.9	Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos em Santa Catarina	76
2.2	MOVIMENTOS DE MASSA	85
2.2.1	Deslizamentos	88
2.2.1.1	<i>Superfície de ruptura</i>	88
2.2.1.2	<i>Condicionantes</i>	90
2.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DAS ENCOSTAS A DESLIZAMENTOS	92
2.3.1	Métodos de mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos	95
2.3.2	Utilização de modelos matemáticos	96
2.3.2.1	<i>Modelo SHALSTAB</i>	97
2.3.3	Distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nas modelagens de suscetibilidade a deslizamentos	100
2.3.3.1	<i>Espacialização dos dados utilizando mapeamento geotécnico</i>	101
2.3.3.2	<i>Espacialização dos dados por geoestatística</i>	102
2.3.4	Distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizando o modelo matemático SHALSTAB	102
2.3.5	Validação das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos	104
2.3.5.1	<i>Inventário de deslizamentos</i>	104
2.3.5.2	<i>Métodos de validação</i>	106
3	ÁREA DE ESTUDO	111
3.1	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOMORFOLÓGICAS.....	112
3.2	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.....	117
4	MATERIAIS E MÉTODOS	126
4.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO	128
4.1.1	Inventário de cicatrizes	129
4.2	ANÁLISE DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS NAS CICATRIZES DOS DESLIZAMENTOS	131

4.3	VALIDAÇÃO DO ENSAIO <i>BOREHOLE SHEAR TEST</i> EM LABORATÓRIO ..	133
4.3.1	Corpos de prova.....	133
4.3.2	<i>Borehole Shear Test</i>	136
4.3.3	Cisalhamento Direto.....	137
4.3.4	Compressão Triaxial	138
4.3.2	Comparação entre os resultados dos ensaios	140
4.4	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM CAMPO.....	141
4.5	ESPACIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS.....	144
4.5.1	Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.....	144
4.5.2	Espacialização por atributos geotécnico, geológico e geomorfológico.....	145
4.5.3	Espacialização por geoestatística	146
4.6	MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS	147
4.6.1	Obtenção dos parâmetros topográficos	147
4.6.2	Obtenção dos parâmetros geotécnicos.....	148
4.6.2.1	<i>Espessura de ruptura do solo</i>	149
4.6.1	Modelagem com o SHALSTAB.....	150
4.6.2	Validação das modelagens	151
4.6.3	Comparação entre as modelagens com melhor validação	152
4.6.4	Elaboração do mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais.....	155
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	156
5.1	ANÁLISE DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS NAS CICATRIZES DOS DESLIZAMENTOS.....	156
5.1.1	Influência da escala nos parâmetros morfológicos das encostas em relação às cicatrizes de deslizamentos	180

5.2	VALIDAÇÃO DO ENSAIO <i>BOREHOLE SHEAR TEST</i> EM LABORATÓRIO ..	184
5.2.1	Características geotécnicas dos corpos de prova	184
5.2.2	Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto, Compressão Triaxial e <i>Borehole Shear Test</i>	186
5.3	ENSAIOS <i>BOREHOLE SHEAR TEST</i> EM CAMPO	193
5.4	ESPACIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	205
5.4.1	Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú	205
5.4.2	Cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos	209
5.5	MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS	216
5.5.1	Parâmetros topográficos	217
5.5.2	Parâmetros geotécnicos	217
5.5.3	Modelagem de suscetibilidade a deslizamentos	221
5.5.3.1	<i>Análise quanto à resolução espacial das modelagens</i>	228
5.5.3.2	<i>Análise quanto aos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo</i>	230
5.5.3.3	<i>Análise quanto aos cenários de espacialização dos parâmetros dos solos</i>	233
5.5.4	Validação das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos	235
5.5.5	Cenários com maior capacidade preditiva	244
5.5.6	Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú	255
6	CONCLUSÕES	260
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	265
	REFERÊNCIAS	266
	APÊNDICE A – Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos na zona costeira de Santa Catarina.	287

APÊNDICE B – Cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para os diferentes cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos (resolução espacial 1 e 10m).....	308
APÊNDICE C – Resultados da modelagem com o SHALTAB e inventário de cicatrizes para os cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (resolução espacial 1 e 10m).....	343
APÊNDICE D – Área Abaixo da Curva (AAC) de Predição para os cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (resolução espacial 1 e 10m).....	363
APÊNDICE E – Hierarquização dos valores de Área Abaixo da Curva (AAC) de Predição para os cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (resolução espacial 1 e 10m).....	377

1 INTRODUÇÃO

Os deslizamentos são movimentos gravitacionais de massa importantes na evolução do relevo que, juntamente a outros processos exógenos e endógenos, agem modelando a paisagem terrestre. Sua ocorrência está relacionada à combinação de um conjunto de fatores, destacando-se a forma e inclinação das encostas, estado de amadurecimento dos solos, geologia e pluviosidade, esta considerada o principal agente deflagrador do fenômeno em regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil.

O país, devido a suas condições climáticas e geológico-geomorfológicas, associadas à falta de planejamento da expansão urbana em áreas de encostas, caracteriza-se por possuir áreas suscetíveis e de risco à ocorrência de desastres naturais associados a deslizamentos (FERNANDES; AMARAL, 2000; GUIMARÃES *et al.*, 2008). Destacam-se os desastres ocorridos nos últimos anos em Santa Catarina em 2008, Angra dos Reis (RJ) e Morro do Bumba em Niterói (RJ) em 2010, Teresópolis (RJ), Nova Friburgo (RJ) e Petrópolis (RJ) em 2011 e 2013, na Baixada Santista (SP) em 2020 e em Petrópolis (RJ) e Recife (PE) em 2022.

Santa Catarina, ao longo de sua história, tem sido significativamente afetada por eventos naturais relacionados a deslizamentos, principalmente na região do Vale do Itajaí. No entanto, analisando a magnitude e extensão dos danos dos eventos, cita-se o de novembro de 2008 como o mais severo até o momento.

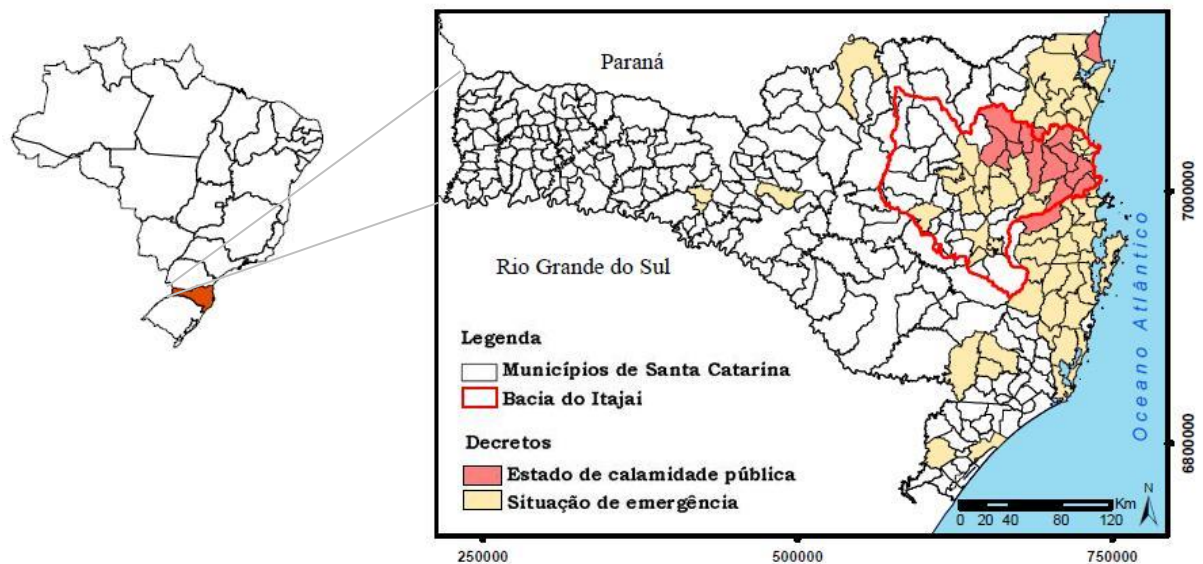
Do ponto de vista meteorológico, foi resultado de uma combinação de sistemas de diferentes escalas espaciais e temporais que culminaram em um volume elevado de precipitação entre os dias 20 e 24 de novembro, principalmente sobre a região do Vale do Itajaí. Essas precipitações intensas e concentradas provocaram numerosos movimentos de massa e inundações na bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, destacando-se o complexo do Morro Baú, que compreende parte dos municípios de Ilhota, Gaspar e Luiz Alves, como uma das regiões mais afetadas.

Segundo dados da Defesa Civil estadual, dos municípios atingidos por inundações e movimentos de massa, Ilhota apresentou o maior número de vítimas fatais, com 46 mortos, além de centenas de desabrigados (SANTA CATARINA, 2008). Do número de mortes registradas em Ilhota, 18 delas foram por soterramento devido a deslizamentos associados a

fluxos de detritos ocorridos nas encostas da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (PEREIRA, 2009).

Devido aos danos causados à população e à infraestrutura, 63 municípios decretaram situação de emergência e outros 14 decretaram estado de calamidade pública (SANTA CATARINA, 2008), praticamente todos eles localizados na bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu (Figura 1). Diante da precária situação, no dia 26 de novembro de 2008, o governo decretou estado de calamidade pública em Santa Catarina por meio do Decreto nº. 1.910/2008.

Figura 1 - Situação decretada nos municípios de Santa Catarina até o dia 8 de dezembro de 2008, após o desastre natural de novembro de 2008.



Fonte: Sbroglia (2015), adaptado de Mattedi *et al.* (2009).

A recorrência, magnitude e os danos causados pelos desastres naturais relacionados aos movimentos de massa e inundações no Brasil motivaram a promulgação da Lei Federal nº. 12.608/2012, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e estabeleceu diretrizes voltadas à gestão e redução dos riscos associados aos desastres naturais no país.

Dentre os objetivos da referida lei, está a implementação de medidas preventivas, pelos municípios, relacionadas à realização de estudos para identificação e avaliação de áreas suscetíveis. De modo geral, a suscetibilidade consiste na análise da probabilidade espacial de ocorrência de um evento natural, independentemente de suas consequências (GUZZETTI, 2005). Dessa forma, o mapa de suscetibilidade constitui um dos primeiros elementos de avaliação e gestão do risco, sendo um instrumento que, quando relacionado ao processo de

ordenamento territorial, contribui para a redução na incidência de desastres naturais, já que apresenta a capacidade de orientar de forma adequada a expansão urbana, com base nas restrições impostas pelo meio físico.

Nesse contexto, ressalta-se o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos a partir do uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) associado ao mapeamento geotécnico e a modelagens matemáticas. Em relação ao mapeamento geotécnico, destaca-se a metodologia de Grandes Áreas de Dias (1995), voltada para solos tropicais. Em relação à modelagem matemática, cita-se o modelo computacional em bases físicas *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB).

Esse método foi utilizado na elaboração das Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização frente aos Desastres Naturais relacionados a deslizamentos, e descrito por Sbroglia *et al.* (2017), para os municípios com maior recorrência de desastres em Santa Catarina. As referidas Cartas, documento cartográfico previsto na Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, elaboradas por meio de uma parceria entre o Ministério das Cidades e a Universidade Federal de Santa Catarina, possuem o intuito de subsidiar o poder público municipal no planejamento do uso e ocupação do solo urbano, atendendo às diretrizes estabelecidas pela Lei Federal nº 12.608/2012.

Entretanto, uma dificuldade na aplicação de modelos preditivos para mapeamento de áreas suscetíveis é a parametrização das propriedades do solo, devido às limitações na obtenção de dados em campo e à realização de análises laboratoriais com uma densidade espacial necessária para definir valores representativos para uma grade contínua (GUIMARÃES *et al.*, 2003). Nesse sentido, grande parte das pesquisas utilizaram parâmetros a partir da generalização de propriedades do solo obtidas em levantamentos de campo (MONTGOMERY; SULLIVAN; GREENBERG, 1998; ZIZIOLI *et al.*, 2013; CERVI *et al.*, 2010; SILVA, 2006; BENESSIUTI, 2011; MICHEL; GOERL; KOBAYAMA, 2015) ou de dados secundários (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; FERNANDES *et al.*, 2001; RAMOS *et al.*, 2002; REDIVO *et al.*, 2004; GOMES, 2006; SORBINO *et al.*, 2006; ZAINDAN; VIEIRA, 2007; FERNANDES, 2009; CARVALHO *et al.*, 2009; LISTO; VIEIRA, 2012; BISPO; LISTO; SILVA, 2018), porém, admite-se que variações desses parâmetros ao longo da área de estudo interferem no desempenho do modelo. Dessa forma, os levantamentos de campo são considerados relevantes a fim de aprimorar o desempenho e resultados das modelagens de suscetibilidade.

Nesse sentido, a realização do ensaio de campo, *Borehole Shear Test* (BST), associado ao mapeamento geotécnico para obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos vem se destacando na região Sul do Brasil, devido a sua praticidade de execução e rapidez na obtenção dos dados, permitindo, assim, maior abrangência do terreno em menor tempo.

Nesta pesquisa, realizou-se um expressivo número de ensaios de cisalhamento por meio do BST e foram gerados diversos cenários de espacialização dos dados para utilização nas modelagens, que posteriormente foram comparadas às cicatrizes dos deslizamentos ocorridos no desastre natural de novembro de 2008. Como resultado, foi apresentado um mapa de áreas suscetíveis a deslizamentos para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, Ilhota (SC), associado a um banco de dados georreferenciado de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos (coesão e ângulo de atrito), com vistas à aplicação no ordenamento territorial a nível municipal.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos com o uso de modelagem matemática.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência da resolução espacial do Modelo Digital de Elevação (MDE) nos parâmetros topográficos das encostas e em relação às cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008;
- Avaliar a aplicabilidade do ensaio de campo *Borehole Shear Test* (BST) no mapeamento geotécnico, em relação aos ensaios de laboratório Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial;
- Analisar a influência da distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nas modelagens de suscetibilidade a deslizamentos;
- Definir a modelagem de suscetibilidade com maior capacidade preditiva por meio da validação com os deslizamentos ocorridos em novembro de 2008;

- Elaborar o mapa de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (SC), a partir da reclassificação do cenário de maior capacidade preditiva.

1.3 JUSTIFICATIVA

A caracterização dos parâmetros geotécnicos em solos residuais é complexa devido a esse material ser resultado de processos físicos, químicos e biológicos sofridos ao longo do tempo. A decomposição, *in loco*, da rocha de origem e de seus minerais reproduzem, no comportamento mecânico do material, um aspecto particular. Dessa forma, destaca-se a importância de analisar os parâmetros geotécnicos de solos residuais, principalmente, devido às particularidades associadas aos tipos de rocha de origem, agentes erosivos, topografia, condição climática e de drenagem e outros fatores que influenciam nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Na determinação desses parâmetros nos solos residuais, é fundamental que a estrutura do solo *in loco* seja preservada nos corpos de prova ensaiados. A estrutura do solo em campo é refletida no arranjo estrutural dos grãos, na existência de cimentações, porosidade, teor de umidade, entre outros. Caso a estrutura do solo seja alterada, pode-se ocorrer a redução na resistência ao cisalhamento. Ainda, solos residuais apresentam elevada variabilidade vertical e lateral, especialmente em relação às suas propriedades geotécnicas, logo, o mapeamento e distribuição espacial dessas propriedades é um desafio na realização de pesquisas e projetos na área de geotecnia, como a análise da estabilidade de encostas.

Na identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos, por exemplo, há um conjunto de métodos e técnicas disponíveis, sendo que a definição de qual adotar está relacionada à escala de análise. Enquanto uns objetivam analisar a instabilidade à escala de encosta (aplicação local), a qual é indispensável o conhecimento das propriedades geotécnicas de forma detalhada, em área e em profundidade; outros destinam-se a avaliar a estabilidade em menor escala (aplicação regional), nesses casos, há dificuldade em inserir informação geotécnica. Além da complexidade em representar a variabilidade vertical e horizontal das características dos solos, há limitações relacionadas à ausência de dados preexistentes e a inviabilidade - de tempo,

recurso financeiro, operadores, equipamentos, estrutura - em muitas pesquisas para a coleta de dados primários de diferentes solos.

Embora Guimarães *et al.* (2003) tenham observado que a aplicação de modelos matemáticos em locais onde as propriedades dos solos são desconhecidas pode ser realizada por meio de um conjunto de parâmetros padrão ou por calibração a partir de intervalo de valores obtido de dados secundários conjuntamente com o inventário de cicatrizes, a execução de ensaios geotécnicos, de campo ou laboratório, para reconhecimento do subsolo, associada ao uso de modelagem é uma alternativa amplamente utilizada na análise de fenômenos naturais que, segundo Carvalho, Macedo e Ogura (2007), são, em sua maioria, de grande complexidade.

Dessa forma, a subjetividade no modelamento matemático fica relacionada à parametrização dos dados geotécnicos de entrada no modelo, atenuando a interferência do operador no resultado final. Cabe ressaltar que o desempenho dos modelos apresenta um incremento de qualidade relacionado ao nível de detalhamento da base cartográfica, como a resolução do MDE como dado de entrada para obtenção dos parâmetros topográficos (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; GUIMARÃES *et al.*, 2003; GOMES *et al.*, 2005).

A espacialização dos parâmetros geotécnicos como dados de entrada no modelo SHALSTAB não foi realizada por seus desenvolvedores na década de 90, contudo, usualmente são atribuídos valores numéricos dos parâmetros geotécnicos para áreas consideradas homogêneas, ou seja, que possuem um conjunto de características que as diferem das adjacentes, utilizando-se, assim, apenas um valor como representativo para toda a área considerada homogênea. A partir disso, na Região Sul do Brasil, foi difundido o emprego do mapeamento geotécnico para a definição dos locais de coleta de solo a ser ensaiado e para a distribuição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento nas modelagens com o SHALSTAB.

Nesse contexto, ao longo da trajetória acadêmica na pesquisa em mapeamentos de suscetibilidade a deslizamentos para grandes áreas, por meio de modelagem matemática, surgiram questionamentos relacionados à influência do método de aquisição dos dados de entrada e à forma de distribuição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos ao longo da área de estudo, nos resultados das modelagens. A hipótese central desta pesquisa é que o uso de unidades geotécnicas – na coleta de dados e na parametrização – em mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos utilizando modelo matemático é a forma mais eficiente (ou

seja, de maior capacidade preditiva de novos deslizamentos) à escala de bacia hidrográfica, com vistas ao adequado ordenamento territorial.

Para a obtenção dos parâmetros geotécnicos utilizou-se um equipamento ainda pouco conhecido e utilizado no país, o *Borehole Shear Test* (BST). O ensaio, que é realizado em campo, além de proporcionar pouca perturbação no solo, apresenta fácil portabilidade e utilização, rapidez na execução e baixa variabilidade dos resultados, podendo abranger grandes áreas. Assim, pôde-se elaborar um banco de dados georreferenciado para a área de estudo a partir de um número expressivo de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, com vistas à experimentação de diferentes formas de distribuição dos dados geotécnicos nas modelagens matemáticas. Salienta-se que esses dados poderão ser utilizados por outros pesquisadores, além de proporcionar qualidade às modelagens, especialmente quando se trata de modelos preditivos, e de agregar confiabilidade aos resultados obtidos.

Por fim, uma etapa indispensável ao mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos é a validação, pois permite estabelecer credibilidade aos cenários elaborados quanto à capacidade preditiva da localização de futuros deslizamentos. Nesse sentido, observa-se que a grande maioria dos trabalhos publicados que se utilizam de modelagem como ferramenta não apresenta etapas de validação tão eficientes quanto às que se propõe no desenvolvimento desta pesquisa. Acredita-se que as centenas de cicatrizes mapeadas, como é o caso da bacia do Ribeirão Baú, e os parâmetros de resistência espacializados permitirão confiabilidade suficiente ao estudo proposto e melhor representatividade do ambiente natural da bacia hidrográfica.

1.3.1 Aspectos de Ineditismo

O principal caráter de ineditismo desta pesquisa é a validação do ensaio *Borehole Shear Test* (BST) em relação aos ensaios de laboratório mais conhecidos e comumente executados, e seu emprego associado ao mapeamento geotécnico.

O BST é um equipamento importado, o primeiro e único no Brasil, adquirido pelo Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO) da UFSC em 2014, que possibilita a determinação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito (c e ϕ , respectivamente) em campo. Sua vantagem em relação aos ensaios tradicionais de laboratório está, principalmente, na fácil

portabilidade do equipamento, na praticidade de realização do ensaio, na rapidez de obtenção dos dados e, possivelmente, com menos perturbação na estrutura do solo.

Devido sua aquisição ser relativamente recente, o ensaio não foi amplamente difundido e utilizado nacionalmente. Também não há, a nível mundial, validação de seu uso em comparação aos ensaios de laboratório, sobretudo com o ensaio de Compressão Triaxial, que é considerada a técnica de laboratório mais adequada na determinação dos parâmetros de resistência, pois possui métodos de preparação das amostras e procedimentos de ensaios bem estabelecidos, capacidade de cisalhar sob condições controladas de tensão e deformação; controle total da drenagem e a capacidade de aplicar um estado de tensões que se aproxima do estado de tensões de campo, fornecendo resultados confiáveis (HEAD, 1985). Entretanto, a moldagem do corpo de prova e a execução do ensaio são excessivamente demoradas e complexas, logo, por questões de praticidade, é comum sua substituição pelo ensaio de Cisalhamento Direto (DAS, 2011).

Alguns autores estrangeiros (HANDY; FOX, 1967; LAMBRECHTS; RIXNER, 1981; YANG, 2005; KHOURY; MILLER, 2006; BECHTUM, 2012; ASHLOCK; LU, 2012; IRIGOYEN; CODUTO, 2015) e brasileiros (CONTESSI, 2016; SAKAMOTO *et al.*, 2016; FLACH, 2020) realizaram pesquisas comparando os resultados do ensaio de campo, *Borehole Shear Test* (BST), com dos ensaios de cisalhamento executados em laboratório. Contudo, cabe ressaltar que, em todos os estudos acessados durante esta pesquisa, os corpos de prova ensaiados em laboratório foram obtidos de amostras indeformadas de solo coletadas em campo, nas quais podem ocorrer alterações dos índices físicos e dos parâmetros de resistência dos solos, e quase todos os ensaios BST foram executados em campo.

Nesse contexto, um aspecto de ineditismo desta pesquisa está na comparação das envoltórias de ruptura e dos valores de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) obtidos nos ensaios *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial executados em laboratório sob as mesmas condições (valores de tensão normal e drenagem) para corpos de prova fabricados com características geotécnicas idênticas, com vista à validação do uso do BST.

Outro aspecto de ineditismo, no contexto mundial, é o uso do BST associado ao mapeamento geotécnico, uma vez que, por se tratar de um ensaio de campo, viabiliza o mapeamento de uma área maior em menos tempo, dessa forma, possibilita a elaboração de um banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento para a área de estudo, dividido

por tipo de unidade geotécnica. Assim, é possível atribuir valor numérico aos parâmetros físicos e de resistência dos solos para as áreas consideradas mais homogêneas quanto a suas características geotécnicas, em relação às adjacentes, e mantendo, ainda, a confiabilidade dos dados obtidos, em comparação aos ensaios mais difundidos e comumente utilizados, como o Cisalhamento Direto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo subdivide-se, de modo geral, em dois temas: o primeiro, em relação à análise da resistência ao cisalhamento dos solos por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb e determinação dos parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, ensaios laboratoriais e de campo mais utilizados para determinação desses parâmetros, e, por fim, apresenta-se um banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento para a zona costeira de Santa Catarina; o segundo, em relação a movimentos de massa, com ênfase em deslizamentos e seus condicionantes, análise de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos e uso de modelo matemático, distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nas modelagens, e, por fim, métodos de validação das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos.

2.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

Os esforços resistentes do solo são chamados de tensões, cuja intensidade é medida pela força por unidade de área. Dessa forma, o estudo da resistência ao cisalhamento dos solos compreende a análise do estado de tensões que provoca sua ruptura.

2.1.1 Solo

Entende-se como solo todo material inconsolidado que recobre o substrato rochoso inalterado, sendo formado por material intemperizado localizado sobre a rocha de origem (*in situ*) ou transportado (PORTO, 2003).

Dessa forma, os solos são provenientes de ações intempéricas sobre as rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas. Os tipos de intemperismo podem ser divididos em físico e químico. O primeiro é proveniente da desagregação mecânica da rocha por meio de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, porém, sem sua alteração mineralógica ou química, formando partículas como os pedregulhos, areias e siltes. O segundo, por sua vez, é resultante da decomposição das rochas ocorrendo sua modificação química ou mineralógica, originando

partículas menores, como as argilas e os minerais secundários (argilominerais e óxi-hidróxidos). Este tipo de intemperismo é mais frequente em regiões de clima quente e úmido.

Nesse sentido, considera-se o solo um sistema trifásico constituído por um conjunto de partículas sólidas (minerais primários ou secundários) que deixam entre si espaços vazios (poros), chamados de vazios, que são preenchidos por água e ar.

2.1.2 Tensões no Solo

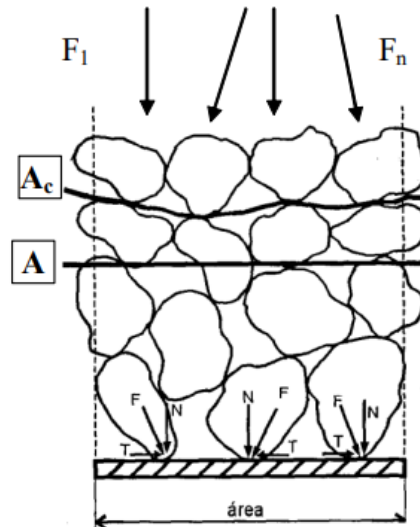
Devido o solo ser constituído por sólidos, água e ar, quando se aplica uma força, parte é transmitida pelos grãos e, dependendo das condições de saturação, parte é transmitida pela água presente nos vazios (PINTO, 2000).

Nos casos de solos compostos por partículas minerais de granulometria maior, em que as três dimensões ortogonais são aproximadamente iguais, como os grãos de silte e areia, a transmissão de forças se faz por meio do contato direto entre os grãos. No caso de partículas de mineral de argila, as forças em cada contato são mínimas e a transmissão pode ocorrer por meio da água adsorvida quimicamente. Nesse sentido, a transmissão se faz nos contatos e, portanto, em áreas muito reduzidas em relação à área total (PINTO, 2000).

Logo, a definição do estado de tensões requer não só a definição dos esforços, mas também da área em que esses esforços são aplicados. Nesse caso, a área considerada deveria passar pelos pontos de contato das partículas minerais (A_c), conforme mostra a Figura 2. No entanto, esse tipo de abordagem torna-se inviável face à variabilidade de tamanhos de grãos e arranjos estruturais (GERSCOVICH, 2008).

Em contrapartida, a adoção de um plano horizontal (A) acarreta a existência de regiões sólidas e regiões que passam pelos vazios. O somatório da área de contato (A_c) é menor que 1% da área total (A), o que faz com que o valor da tensão, considerando-se exclusivamente a transmissão dos esforços pelos contatos, seja significativamente mais alta do que aquela considerada em termos médios. Apesar do conceito de transmissão por meio dos contatos entre grãos ser fisicamente mais correto, não seria possível desenvolver modelos matemáticos que representassem isoladamente as forças transmitidas. Dessa forma, define-se que as tensões normal (N) e tangencial (T) ao plano são tratadas do ponto de vista macroscópico, considerando a área total (A) (GERSCOVICH, 2008).

Figura 2 - Esforços atuantes no contato entre os grãos e definição das tensões.



Fonte: Gerscovich (2008).

Qualquer ponto no interior de uma massa de solo é solicitado por esforços devido ao peso próprio e os esforços externos que atuam sobre o solo. Esses esforços resultam em estados de tensão normal (σ) e cisalhante (τ), que variam em função do plano considerado.

O somatório das componentes normais ao plano (N) dividido pela área total (A) que abrange as partículas em que os contatos ocorrem é definido como tensão normal (σ) e dado pela Equação 1.

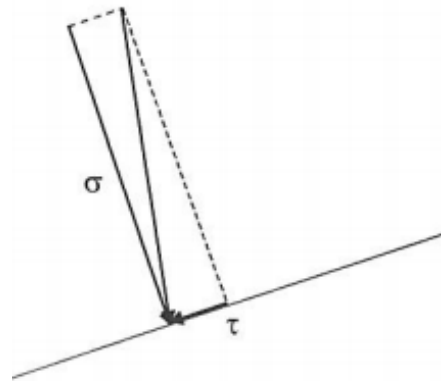
$$\sigma = \frac{\sum N}{A} \quad (1)$$

Por sua vez, o somatório dos esforços tangenciais (T) dividido pela área total (A) é referido como tensão cisalhante (τ) e dado pela Equação 2.

$$\tau = \frac{\sum T}{A} \quad (2)$$

Num plano genérico no interior do subsolo, a tensão atuante não é necessariamente normal ao plano. Para efeito de análises, ela pode ser decomposta em uma componente perpendicular ao plano (tensão normal) e em outra paralela ao plano (tensão cisalhante), como se mostra na Figura 3.

Figura 3 - Decomposição da tensão em um plano genérico.

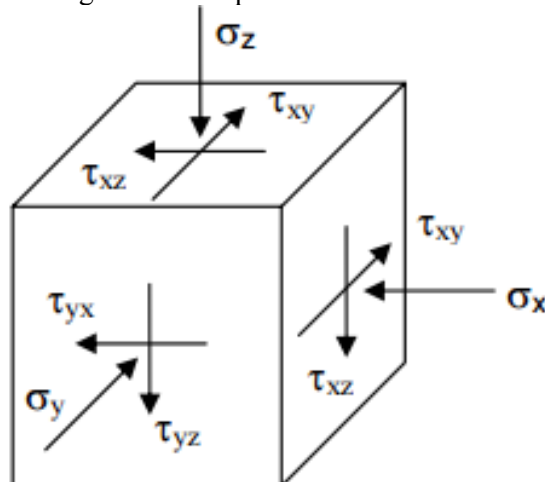


Fonte: Pinto (2000).

Em qualquer ponto do solo, a tensão atuante e a sua inclinação em relação à tensão normal ao plano variam conforme o plano considerado. Constata-se que sempre existem três planos em que a tensão atuante é normal ao próprio plano, não existindo componente de cisalhamento (Figura 4). Demonstra-se, ainda, que esses planos são ortogonais entre si e recebem o nome de planos de tensão principal ou planos principais, e as tensões neles atuantes são chamadas de tensões principais (PINTO, 2000).

A maior das tensões atuantes é chamada de tensão principal maior (σ_1), a menor é chamada de tensão principal menor (σ_3) e a outra é chamada de tensão principal intermediária (σ_2). Embora a tensão principal intermediária (σ_2) influencie na resistência ao cisalhamento dos solos, devido seus efeitos não serem perfeitamente compreendidos, normalmente, ela é desprezada (DAS, 2011).

Figura 4 - Componentes de tensão.



Fonte: Tonin (2014).

No estado plano de deformações, quando se conhecem os planos e as tensões principais num ponto, podem-se determinar as tensões em qualquer plano que passa por esse ponto. Dessa forma, obtêm-se as Equações 3 e 4, que indicam a tensão normal (σ) e a tensão cisalhante (τ) em função das tensões atuantes nos planos principais σ_1 e σ_3 e do ângulo α que o plano considerado determina com o plano principal maior.

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos(2\alpha) \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin(2\alpha) \quad (4)$$

2.1.3 Círculos de Mohr

O estado de tensões atuantes em todos os planos que passam por um ponto pode ser representado graficamente num sistema de coordenadas em que as abscissas são as tensões normais (σ) e as ordenadas são as tensões cisalhantes (τ). Nesse sistema, as Equações 3 e 4 definem um círculo, chamado de círculo de Mohr. Construído o círculo de Mohr, podem-se determinar as tensões em qualquer plano.

Para determinar a resistência ao cisalhamento do solo, são realizados ensaios variando os valores de σ_3 , e elevando-se σ_1 até a ruptura. Logo, cada círculo de Mohr representa o estado de tensões na ruptura de cada ensaio. A linha que tangência esses círculos é definida como a envoltória de ruptura de Mohr.

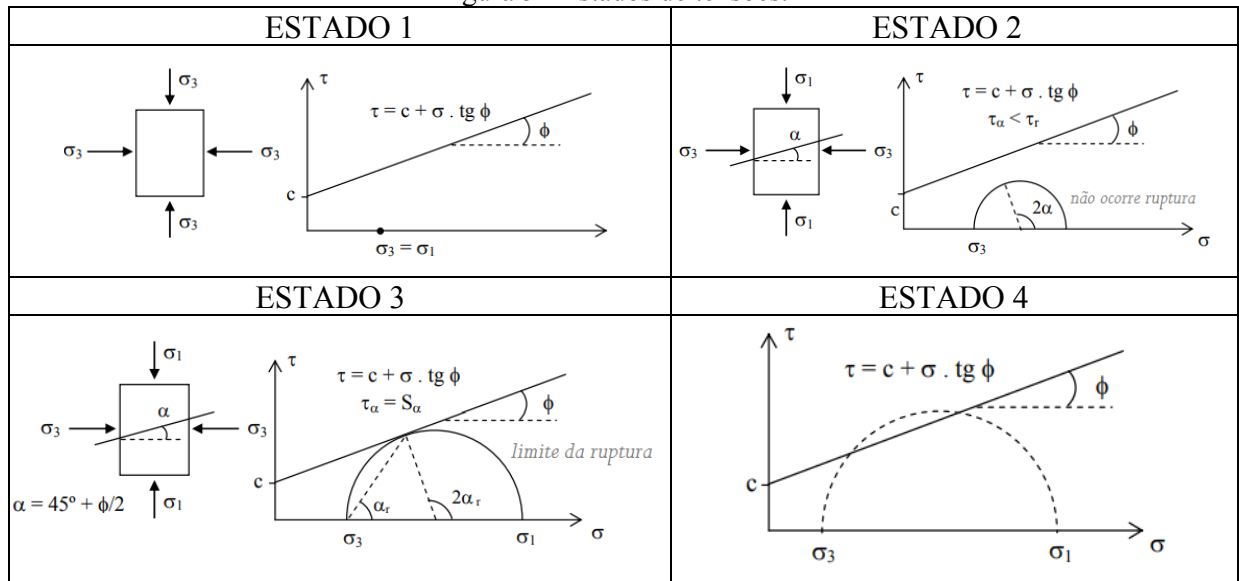
Para melhor compreensão do conceito de envoltória de ruptura, são apresentados na Figura 5 os quatro estados de tensões, conforme descrito por Tonin (2014):

- *Estado 1* - a amostra de solo está submetida a uma pressão hidrostática (igual em todas as direções). O estado de tensão desse solo é representado pelo ponto σ_3 e τ é nula;
- *Estado 2* - o círculo de Mohr localiza-se inteiramente abaixo da envoltória. A tensão cisalhante (τ_α) no plano de ruptura é menor que a resistência ao cisalhamento do solo (τ) para a mesma tensão normal. Não ocorre a ruptura;
- *Estado 3* - o círculo de Mohr tangência a envoltória de ruptura. Nesse caso, atingiu-se, em algum plano, a resistência ao cisalhamento do solo e ocorre a ruptura. Essa condição

ocorre em um plano inclinado a um ângulo α crítico com o plano onde atua a tensão principal maior;

- *Estado 4* - é impossível de se obter este círculo de Mohr, pois antes de ser atingido esse estado de tensões já estaria ocorrendo ruptura em vários planos, ou seja, existiriam planos em que as tensões cisalhantes seriam superiores à resistência ao cisalhamento do solo.

Figura 5 - Estados de tensões.



Fonte: adaptado de Tonin (2014).

2.1.4 Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

A análise do estado de tensões que provoca a ruptura é o estudo da resistência ao cisalhamento dos solos. A resistência ao cisalhamento do solo pode ser definida como a 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 estiver ocorrendo. Logo, a ruptura em si é caracterizada pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo.

Os critérios de ruptura que melhor representam o comportamento dos solos são os de Mohr e Coulomb. De acordo com o critério de Mohr, a ruptura ocorre quando, no plano de ruptura, a combinação das tensões normais e cisalhantes (σ , τ) é tal que a tensão de cisalhamento é máxima e só vai depender da tensão normal, isto é $\tau = f(\sigma)$. Essa combinação de tensões, avaliada por meio do círculo de Mohr, resulta em uma envoltória curva que circunscreve os círculos correspondentes à ruptura. Logo, não ocorrerá ruptura enquanto o círculo

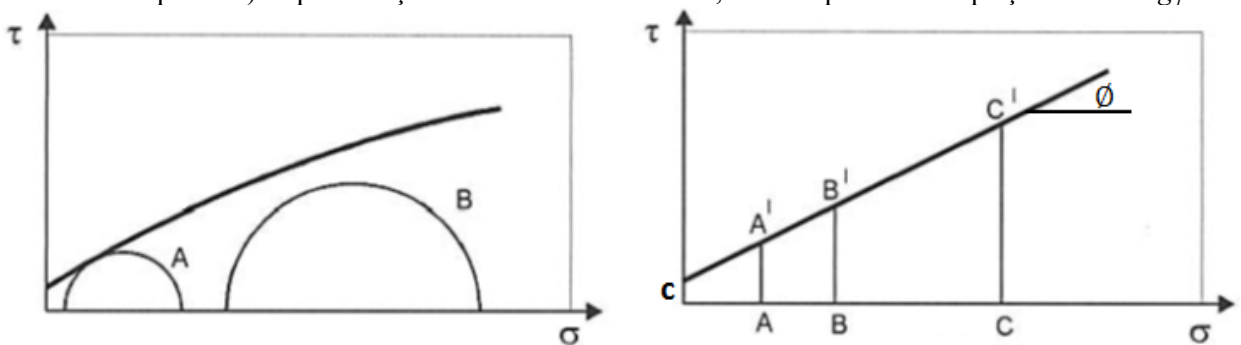
representativo do estado de tensões se encontrar no interior da envoltória curva, conforme Figura 6a (PINTO, 2000).

Envoltórias curvas são de difícil aplicação. Por essa razão, as envoltórias de Mohr são frequentemente substituídas por retas que melhor se ajustam à envoltória. Naturalmente, várias opções de retas podem ser adotadas, devendo a escolha levar em consideração o nível de tensões. Definida uma reta, seu coeficiente linear não tem mais o sentido de coesão, que seria parcela de resistência em função da tensão normal, razão pela qual é referido como intercepto de coesão (PINTO, 2000).

O critério de Coulomb estabelece que a resistência do solo é dada em uma função linear, instituindo que não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar o valor dado pela expressão $\tau = c + \sigma \cdot \varphi$ (Figura 6b). Sendo c e φ os parâmetros do solo coesão e coeficiente de atrito interno, podendo este ser expresso como a tangente de um ângulo, denominado ângulo de atrito interno, respectivamente, e σ a tensão normal existente no plano de cisalhamento (PINTO, 2000).

Fazendo-se uma reta com a envoltória de Mohr, seu critério de resistência fica análogo ao de Coulomb, justificando a expressão critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Figura 6 - a) Representação do critério de Mohr, sendo o círculo B representativo de um estado de tensões em que não há ruptura e o círculo A, tangente à envoltória de Mohr, indicativo de um estado de tensões na ruptura. b) Representação do critério de Coulomb, a reta representa a equação $\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$.



Fonte: Sbroglia (2015), adaptado de Pinto (2000).

Desse modo, o critério de ruptura Mohr-Coulomb pode ser expresso por meio da Equação 5.

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

onde τ é a tensão cisalhante [kPa], σ a tensão normal ao plano [kPa], c a coesão [kPa] e φ o ângulo de atrito [graus].

Em 1952, Terzaghi concluiu que somente as pressões efetivas por atrito de contato grão a grão mobilizam resistência ao cisalhamento, estabelecendo então que a tensão total (σ) deveria ser substituída pela tensão efetiva (σ') na equação de Mohr-Coulomb. Assim, a equação passou a ser apresentada da seguinte forma (Equação 6).

$$\tau = c + \sigma' \cdot \tan\varphi \quad (6)$$

A tensão efetiva é dada por $\sigma' = \sigma - \mu$, ou seja, a subtração da tensão total pela tensão neutra ou poropressão (μ), que é a tensão na água dos poros.

Hvorslev, ao analisar argilas saturadas, verificou que a coesão não apresenta um valor constante. Concluiu, então, que o teor de umidade (w) modifica o comportamento do solo em relação à resistência, ou seja, que nessa situação a coesão (c) é função essencial do teor de umidade, $c = f(w)$. Dessa forma, possibilitou que a Equação 6 fosse escrita da seguinte forma (Equação 7).

$$\tau = f(w) + (\sigma - \mu) \cdot \tan\varphi \quad (7)$$

Nesse contexto, pode-se afirmar que a resistência ao cisalhamento dos solos depende dos chamados parâmetros de resistência: coesão e atrito.

2.1.5 Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos

2.1.5.1 Coesão

De um modo geral, pode-se definir a coesão como a parcela de resistência ao cisalhamento de um solo, independente da tensão efetiva normal atuante, provocada pela atração físico-química entre as partículas ou pela cimentação dessas (ABNT NBR6502, 1995). Pode ser dividida em coesão verdadeira e coesão aparente.

A coesão verdadeira é gerada pelas forças eletroquímicas de atração das partículas de argila ou resultante da cimentação. A cimentação é proporcionada por sílicas, carbonatos e óxidos presentes nos contatos entre os grãos do solo e pode apresentar diversas origens como de processos pedogenéticos, processos deposicionais ou herdada da rocha de origem.

A coesão aparente, por sua vez, ocorre em solos parcialmente saturados ($0 < S < 100\%$), originada da atração entre os grãos de solo decorrente da presença de meniscos capilares nos contatos entre os grãos por meio da pressão capilar da água. Esse tipo de coesão é chamada de aparente, pois quando o solo é totalmente seco ou saturado, ela desaparece. Embora mais visível nas areias, é nos solos argilosos que a coesão aparente adquire valores maiores (PINTO, 2000).

A coesão é uma característica típica dos solos muito finos (argilas ou siltes plásticos), diretamente relacionada à consistência. A resistência ao cisalhamento de uma argila pura em determinadas condições de sollicitação pode ser expressa por $\tau = c$ (BARATA, 1984).

No entanto, destaca-se que o fenômeno físico de coesão não deve ser confundido com a coesão correspondente a uma equação de resistência ao cisalhamento. Embora leve o mesmo nome, esta indica simplesmente o intercepto de uma equação linear de resistência válida para uma faixa de tensões mais elevada e não para tensão normal nula ou próxima de zero (PINTO, 2000).

2.1.5.2 *Ângulo de atrito*

Define-se atrito interno como a parcela da resistência ao cisalhamento de um solo correspondente à força de atrito desenvolvida no deslizamento entre os grãos (ABNT NBR6502, 1995). Logo, o atrito ocorre quando se verifica tendência ao movimento, podendo ocorrer por deslizamento ou por entrosamento.

Por deslizamento, o atrito é gerado entre as superfícies dos grãos quando um tende a ser mover em relação ao outro, ressalta-se que, por possuírem uma superfície rugosa, há uma infinidade de contatos pontuais. Por entrosamento ou embricamento, o atrito é causado pelo encaixe entre os grãos do solo.

A resistência por atrito entre as partículas depende do coeficiente de atrito, e pode ser definida como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano em outro paralelamente a este. Essa força também é proporcional à força normal ao plano. Na equação de Mohr-Coulomb é indicada pelo termo $\sigma \cdot \tan\phi$. O ângulo formado entre a força normal e a resultante das forças, tangencial e normal, é chamado de ângulo de atrito (ϕ), sendo o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter com a normal ao plano sem que haja deslizamento.

2.1.5.3 Fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento

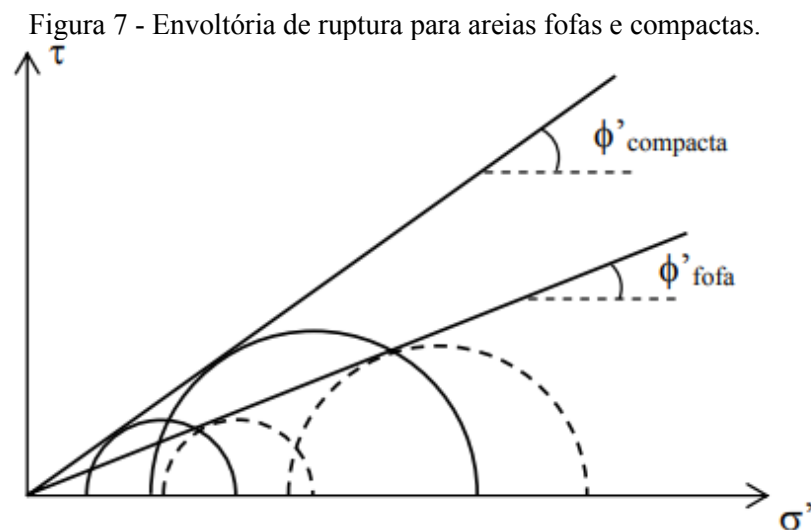
- Solos arenosos ou não coesivos ($c = 0$)

Os solos arenosos têm como principal característica a elevada permeabilidade, logo, possuem drenagem livre e pressão neutra (μ) nula. Segundo Pinto (2000), os fatores que influenciam no valor do ângulo de atrito dos solos arenosos durante o cisalhamento são a forma dos grãos, a distribuição granulométrica e a compactidade.

Com relação à forma dos grãos, os solos arenosos constituídos por grãos esféricos e arredondados possuem ângulo de atrito sensivelmente menor do que os constituídos por grãos angulares. Tal fato se deve a menor tendência a deslizarem entre si e ao maior entrosamento entre os grãos irregulares.

Quanto à distribuição granulométrica do solo, quando se apresenta bem distribuído granulometricamente, melhor é o entrosamento entre os grãos e, conseqüentemente, maior o ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento.

Por fim, a compactidade está relacionada ao entrosamento entre os grãos do solo, e quanto maior a compactidade, maior é o ângulo de atrito (Figura 7). Logo, solos mais compactos são mais resistentes ao cisalhamento do que solos fofos. Ressalta-se ainda que, quanto maior a compactidade e o entrosamento entre os grãos, maior a tendência da amostra em aumentar de volume durante o cisalhamento. Nesse sentido, antes de atingir a ruptura, solos compactos aumentam e os solos fofos diminuem de volume.



Fonte: Tonin (2014).

Os autores Caputo (1975), Barata (1984), Ortigão (2007), Pinto (2000) e Das (2007) apresentam valores típicos de ângulo de atrito para solos arenosos, que variam de 25 a 48°, dependendo do grau de compactação, da granulometria, do tamanho e da forma dos grãos.

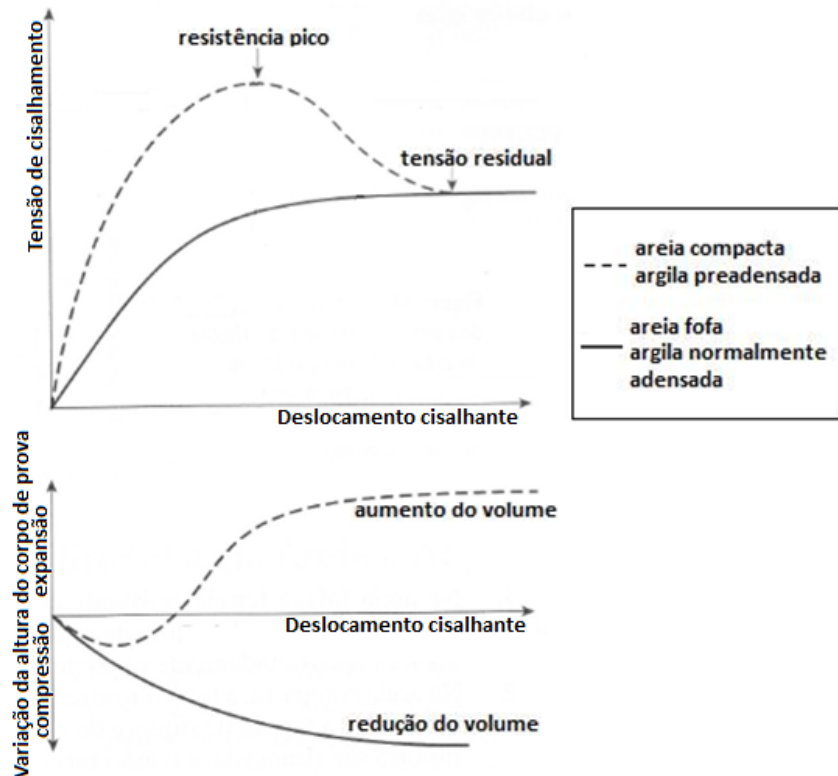
- Solos argilosos ou coesivos ($c > 0$; $\phi = 0$)

Os solos argilosos caracterizam-se por serem de baixa permeabilidade. Nesse sentido, os principais fatores que influenciam na resistência ao cisalhamento são o estado de adensamento do solo, a sensibilidade de sua estrutura, as condições de drenagem e a velocidade de aplicação das cargas.

De acordo com o estado de consolidação do solo argiloso, pode apresentar comportamentos diferentes quando relacionados à resistência. Um solo normalmente adensado é aquele que sofreu processo de adensamento ao longo do tempo, estando ainda submetido aos mecanismos que provocaram o adensamento. Um solo pré-adensado, por sua vez, é aquele que em algum momento esteve submetido a uma carga superior a que está agindo atualmente sobre ele, apresentando um comportamento mecânico diferenciado (ABNT NBR 6502, 1995).

Desse modo, observa-se que o comportamento das argilas normalmente adensadas é bastante semelhante ao das areias fofas, devido sua coesão ser aproximadamente zero (DAS, 2011): lento acréscimo de tensão com a deformação horizontal e redução de volume durante o carregamento. Por outro lado, o comportamento de argilas confinadas a tensões significativamente menores do que a tensão de pré-adensamento é bastante semelhante ao das areias compactadas: acréscimos mais rápidos da tensão de cisalhamento, resistência de pico para pequenas deformações específicas, queda da resistência após ter sido atingido o valor máximo e aumento de volume durante o processo de cisalhamento (PINTO, 2000). Esses comportamentos podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 - Comportamento típico de areias e argilas.



Fonte: Sbroglia (2015), adaptado de Das (2007).

Quanto à sensibilidade, solos argilosos sensíveis quando amolgados apresentam resistências menores. Em relação à condição de drenagem e à velocidade de aplicação das cargas, a velocidade de escoamento da água influencia no desenvolvimento das pressões neutras (μ) apresentadas no momento da ruptura do solo, logo, em solos com baixa permeabilidade, para simular seu comportamento totalmente drenado em laboratório, as fases do ensaio devem ser suficientemente lentas para permitir a total dissipação de μ . Desse modo, quanto maior a velocidade na ruptura, menor a resistência ao cisalhamento do solo.

Para solos argilosos residuais, a coesão e ângulo de atrito dependem de diversos fatores, não sendo possível indicar valores típicos, salientando-se a importância dos ensaios de campo ou laboratoriais para sua determinação.

2.1.6 Ensaio geotécnicos para obtenção dos parâmetros de resistência

Os parâmetros c e φ não são constantes em um solo. Eles podem ser determinados utilizando vários métodos como, a correlação empírica, os ensaios de campo ou os ensaios de laboratório.

A correlação empírica é um modo de determinar os parâmetros a partir de análises de resultados obtidos por outros ensaios, sendo frequentemente utilizadas correlações com os resultados do ensaio *Standard Penetration Test* - SPT. Dentre os ensaios de campo realizados *in situ*, os mais empregados para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento são o ensaio de palheta ou *Vane Shear Test*, o ensaio *Cone Penetration Test* - CPT, o ensaio pressiométrico (*Pressiometer Ménard Test* - PMT) e o ensaio de furo (*Borehole Shear Test* - BST). Dos ensaios realizados em laboratório, dois se destacam como os mais utilizados, o ensaio de Cisalhamento Direto e o ensaio de Compressão Triaxial.

Será dada ênfase aos ensaios realizados neste estudo, de laboratório - ensaios de Cisalhamento Direto e de Compressão Triaxial, e de campo - *Borehole Shear Test* (BST).

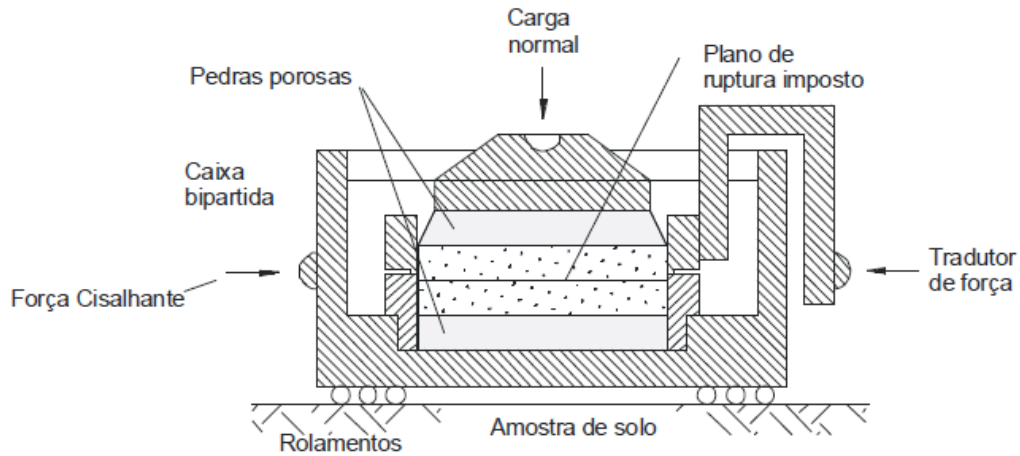
2.1.6.1 Ensaio de Cisalhamento Direto

No estudo de estabilidade de taludes geralmente são realizados os ensaios de laboratório, destacando-se o ensaio de Cisalhamento Direto devido a sua simplicidade, praticidade, facilidade de coleta e moldagem do corpo de prova e rapidez na execução.

Segundo Ortigão (2007), Pinto (2000) e Das (2007), o ensaio de Cisalhamento Direto é o procedimento mais antigo para determinar a resistência ao cisalhamento de um solo, e se baseia diretamente no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O objetivo do ensaio é determinar qual a tensão de cisalhamento capaz de provocar a ruptura de uma amostra de solo, em um plano de ruptura predefinido.

O ensaio se caracteriza pela aplicação de uma tensão normal (σ) num plano e a verificação da tensão cisalhante (τ) que provoca a ruptura (Figura 9). O corpo de prova é colocado em uma caixa bipartida composta de duas seções (superior e inferior) destacáveis e duas pedras porosas, uma superior e outra inferior, permitindo a drenagem da amostra conforme o tipo de ensaio (Figura 10a e 10b).

Figura 9 - Equipamento empregado no ensaio de Cisalhamento Direto.

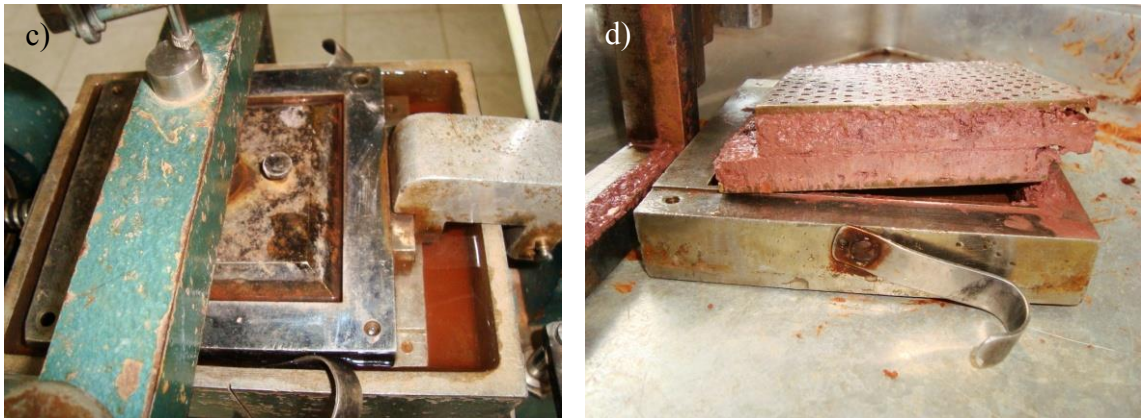


Fonte: Ortigão (2007).

De um modo geral, o ensaio de Cisalhamento Direto pode ser dividido em dois estágios: o primeiro diz respeito à consolidação, consolida-se o corpo de prova por meio da aplicação da tensão normal, que é mantida constante; e o segundo estágio é o do cisalhamento, com o auxílio de uma máquina de deformação controlada, imprime-se deslocamento à seção inferior da caixa (Figura 10c), aplicando então uma tensão cisalhante que é aumentada, gradativamente, até produzir a ruptura do corpo de prova por cisalhamento ao longo do plano de contato entre as duas seções da caixa, Figura 10d. A velocidade de ruptura constante é condicionada ao tipo de solo ensaiado, para as areias pode ser elevada, enquanto para as argilas deve ser baixa, devido esse solo apresentar baixa permeabilidade.

Figura 10 - Ensaio de Cisalhamento Direto: a) montagem da caixa bipartida e corpo de prova; b) equipamento utilizado no ensaio; c) detalhe da aplicação da tensão cisalhante resultando no deslocamento da seção inferior da caixa bipartida; d) corpo de prova após a execução do ensaio.





Fonte: Sbroglia (2015).

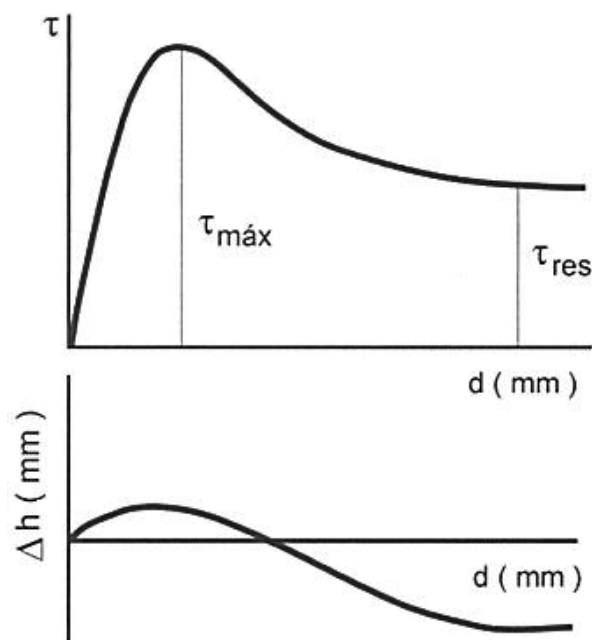
Os ensaios de Cisalhamento Direto podem ser realizados em diferentes condições de consolidação e ruptura: no ensaio consolidado drenado, as tensões são aplicadas lentamente e é permitida a saída de água por meio das pedras porosas, mantendo a pressão neutra constantemente desprezível, o qual resulta na redução do volume do corpo de prova. Verifica-se que esse tipo de ensaio fornece os maiores valores de resistência; no ensaio consolidado não-drenado, a pressão é aplicada lentamente, como no primeiro caso, no entanto, a saída de água não é permitida; no ensaio não-consolidado e não-drenado, as tensões são aplicadas rapidamente e é impossibilitada a saída da água intersticial da amostra, apoiada sobre uma placa impermeável. Verificam-se os menores valores de resistência neste tipo de ensaio, no entanto, para solos parcialmente saturados, as diferenças de resultados não são tão sensíveis (CAPUTO, 1975).

Ensaio em areias são realizados sempre de forma que as pressões neutras se dissipem, e os resultados são considerados em termos de tensões efetivas. No caso de argilas, por sua vez, podem-se realizar ensaios drenados, que são lentos, ou não drenados, neste caso o carregamento deve ser rápido, para impossibilitar a saída da água (PINTO, 2000).

De acordo com Vargas (1977), embora haja pouca influência da presença da água no valor do ângulo de atrito, há uma notável influência sobre a coesão, que diminui com a inundação do solo. Assim, para se calcular a estabilidade de um talude que possa vir a saturar-se é necessário que o ensaio para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento seja executado em corpos de prova inundados, dessa forma, elimina-se a coesão aparente, a fim de simular uma condição crítica devido à ocorrência de elevada precipitação.

A razão entre as forças normal e tangencial aplicadas e a área da seção transversal do corpo de prova indicam as tensões σ e τ que ocorrem na amostra. A tensão τ pode ser representada em função do deslocamento horizontal (d), no sentido do cisalhamento, no qual se identificam a tensão de ruptura ($\tau_{\text{máx}}$) e a tensão residual (τ_{res}), conforme Figura 11. A tensão residual é aquela que o corpo de prova sustenta após ultrapassada a tensão de ruptura, somente em função da coesão e do atrito. Também é registrada a deformação vertical (h), indicando se houve diminuição ou aumento de volume durante o cisalhamento (PINTO, 2000).

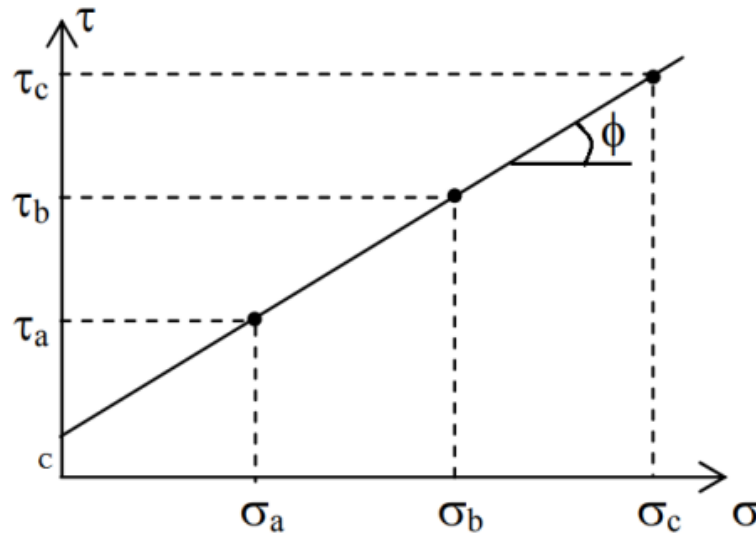
Figura 11 - Representação do resultado típico do ensaio.



Fonte: Pinto (2000).

O resultado de um estágio do ensaio de Cisalhamento Direto em um corpo de prova compõe um ponto no diagrama de Mohr, pelo qual podem ser traçados vários círculos. No entanto, repetindo-se o ensaio para outros corpos de prova com tensões normais diferentes, obtém-se um conjunto de pares de valores (σ, τ) , que inseridos em um sistema cartesiano $\tau = f(\sigma)$, obtém-se a envoltória de ruptura. Essa permite determinar os parâmetros c e ϕ , como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Envoltória de ruptura Mohr-Coulomb para determinação de c e ϕ .



Fonte: adaptado de Tonin (2014).

Embora o ensaio seja prático, a análise do estado de tensões durante o carregamento é complexa. O plano horizontal, antes da aplicação das tensões cisalhantes, é o plano principal maior. Com a aplicação de τ , ocorre a rotação dos planos principais. As tensões são conhecidas apenas num plano. Por outro lado, ainda que se imponha que o cisalhamento ocorra no plano horizontal, ele pode ser precedido de rupturas internas em outras direções (TONIN, 2014).

Dessa forma, uma das desvantagens do ensaio de Cisalhamento Direto, apontada por Ortigão (2007), é em relação à imposição do plano de ruptura. Segundo o autor, quando se trata de ensaiar solos aparentemente homogêneos, cujo plano de fraqueza não foi detectado *a priori*, pode-se incorrer no erro de se moldar o corpo de prova segundo a direção de maior resistência obtendo-se, assim, resultados desfavoráveis à segurança.

2.1.6.2 Ensaio de Compressão Triaxial

O ensaio de Compressão Triaxial, clássico na mecânica dos solos, tem como principais referências Bishop e Henkel (1962) e Head (1985).

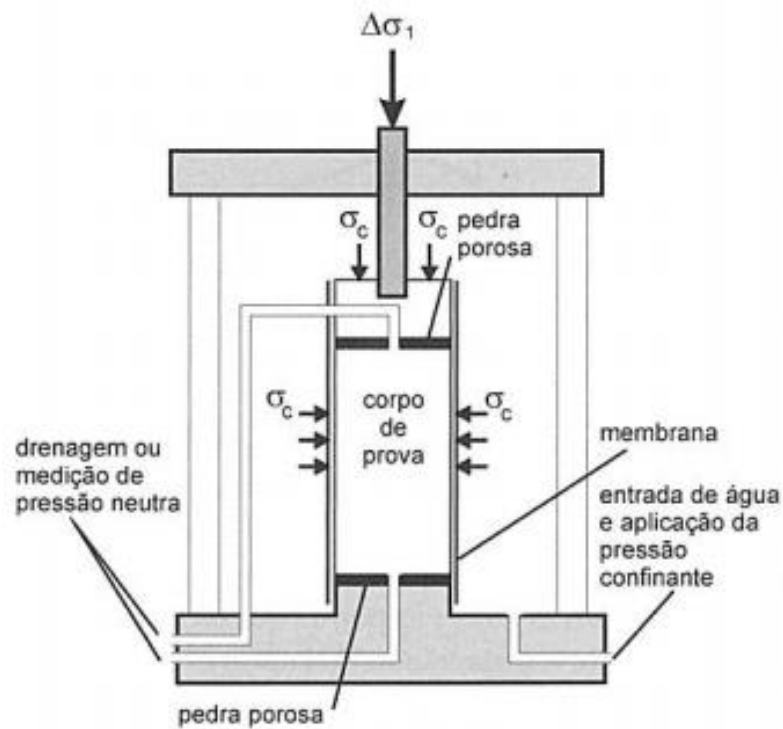
Segundo Das (2011), o ensaio de Compressão Triaxial é o mais adequado e confiável para determinação de parâmetros de resistência em laboratório, contudo, na análise de

estabilidade de taludes geralmente são realizados ensaios de Cisalhamento Direto devido a sua simplicidade de execução, praticidade, facilidade de coleta e moldagem do corpo de prova.

O ensaio de Compressão Triaxial consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico de solo, com altura normalmente equivalente ao dobro do diâmetro, o qual possibilita a formação de uma superfície de ruptura livre.

O corpo de prova é colocado dentro de uma câmara cilíndrica e envolvido por uma membrana de borracha comprimida no topo e na base (BISHOP; HENKEL, 1962). Entre a base da câmara e o corpo de prova utiliza-se uma pedra porosa para facilitar a drenagem, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Equipamento padrão utilizado no ensaio de Compressão Triaxial.



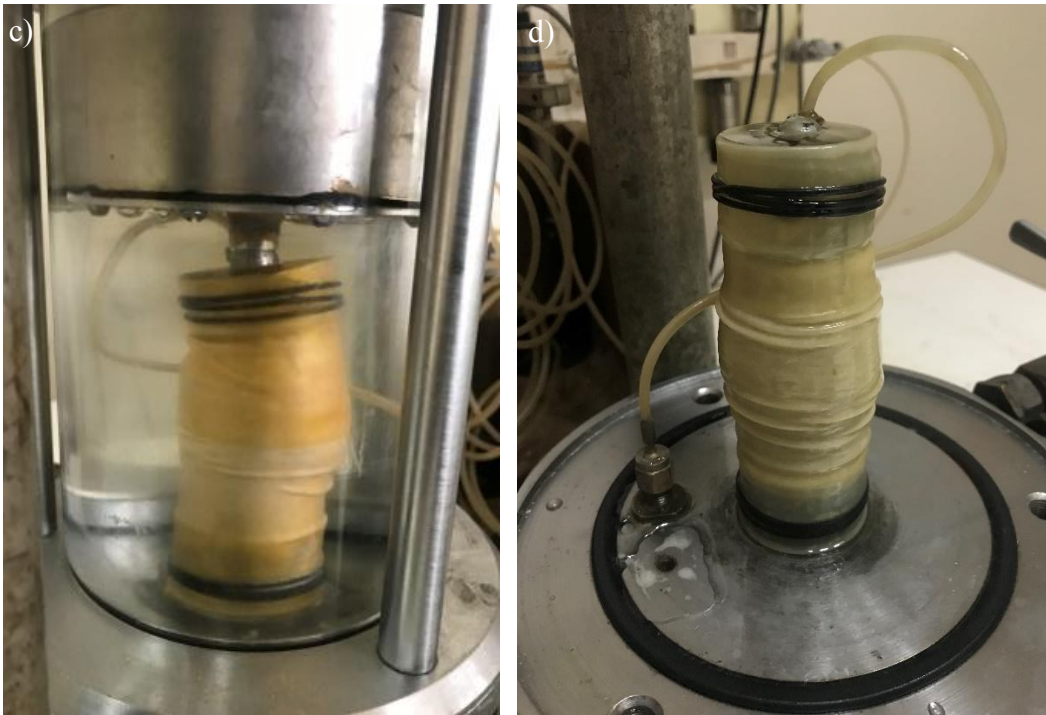
Fonte: Pinto (2000).

De um modo geral, o ensaio é executado em dois estágios: o primeiro é a consolidação por meio da aplicação da tensão confinante (σ_c), e o segundo é o cisalhamento por meio da aplicação da tensão desviadora (σ_d).

Inicialmente, a câmara é preenchida com água, aplicando-se, assim, a tensão confinante (σ_c). Dessa forma, o corpo de prova fica sob um estado hidrostático de tensões (isotrópico), pois a σ_c é igualmente distribuída em toda a superfície do corpo de prova, atuando em todas as direções, inclusive na vertical (PINTO, 2000). Esse estágio é chamado de consolidação do corpo de prova. No estágio de cisalhamento, aplica-se um incremento de tensão desviadora ($\Delta\sigma_d$) por meio de um pistão, até a ruptura da amostra (Figura 14).

Figura 14 - Ensaio de Compressão Triaxial: a) equipamento; b) câmara; c) câmara preenchida com água e cisalhamento do corpo de prova; d) corpo de prova após a execução do ensaio.

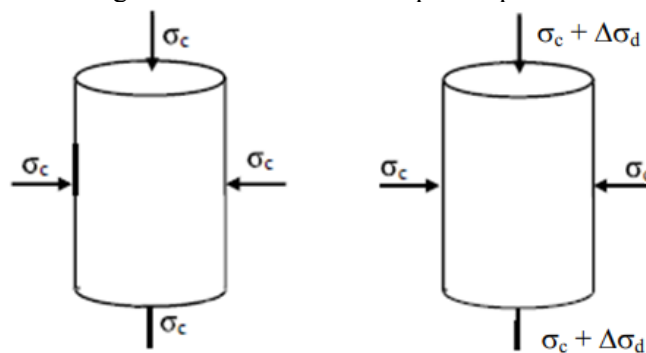




Fonte: Autora.

Como não existem tensões de cisalhamento na superfície do corpo de prova, as tensões axiais ($\sigma_c + \Delta\sigma_d$) e de confinamento (σ_c) são, respectivamente, as tensões principais maior (σ_1) e menor (σ_3) (Figura 15). O incremento de tensão $\Delta\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ é chamado de tensão desviadora. As tensões desviadoras obtidas durante o carregamento axial permitem a construção dos respectivos círculos de Mohr (TONIN, 2014).

Figura 15 - Tensões nos corpos de prova.



Fonte: adaptado de Tonin (2014).

No que se refere às condições de drenagem, pode-se permitir ou não a drenagem do corpo de prova durante o ensaio de Compressão Triaxial por meio de uma válvula. Assim, o

ensaio pode ser realizado na condição consolidado isotropicamente e drenado - em que é permitida a drenagem do corpo de prova, aumentando a tensão gradativamente para que a água possa sair. Assim, a pressão neutra ou poropressão (μ) durante o carregamento é praticamente zero e as tensões totais aplicadas indicam as tensões efetivas (σ'); consolidado isotropicamente e não drenado - em que se aplica a tensão confinante até dissipar a poropressão, dessa forma, o corpo de prova se adensa sob tensão confinante, após aplica-se o carregamento axial sem drenagem, esse ensaio indica a resistência não drenada em função da tensão de adensamento; não consolidado e drenado ou não consolidado e não drenado - em que se aplica a tensão confinante e, em seguida, o carregamento axial permitindo e sem permitir a drenagem, respectivamente. O ensaio é geralmente interpretado em termos da tensão normal, se o corpo de prova estiver saturado ele não terá variação de volume, pois a umidade permanece constante (TONIN, 2014).

De acordo com Espíndola (2016), o ensaio de Compressão Triaxial, por meio dos procedimentos apresentados por Bishop e Henkel (1962) e por Head (1985), é ideal para simulações das condições de campo, principalmente em relação aos estados de tensões e às condições de drenagem. Dessa forma, em estudos de estabilidade de taludes, os ensaios consolidado isotropicamente e drenado, que na engenharia prática simulam condições de maciços confinados com drenagem permitida, são os mais indicados.

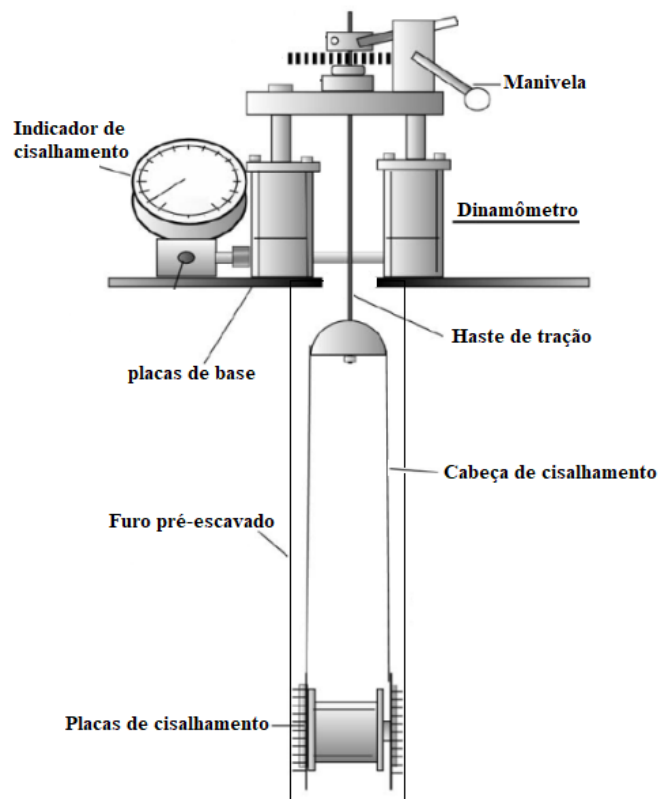
2.1.6.3 *Borehole Shear Test*

Em relação aos ensaios de campo, o equipamento *Borehole Shear Test* (BST) vem sendo utilizado nos últimos anos por pesquisadores e empresas devido a sua facilidade de utilização, rapidez de execução e baixa variabilidade dos resultados (LUTENEGGER; TIMIAN, 1987).

O ensaio *Borehole Shear Test* (BST), bem como o *Rock Borehole Shear Test* (RBST), foi desenvolvido na Universidade do Estado de Iowa (EUA), em meados da década de 60, pelo professor Ph.D. Richard L. Handy e sua equipe de trabalho (HANDY; FOX, 1967). O ensaio BST objetiva medir a resistência ao cisalhamento em relação à tensão normal aplicada fornecendo dados de ruptura de cisalhamento, assim, obtêm-se os valores de coesão e ângulo de atrito interno da superfície ensaiada.

Para a execução do ensaio em solo são utilizadas as instruções da empresa fabricante do equipamento, *Handy Geotechnical Instruments*, fundada pelo professor Handy. De acordo com a *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, o BST é executado utilizando uma sonda cisalhante expansível em um furo pré-escavado, sendo transmitida uma tensão que permite a expansão da sonda contra a parede do furo, comprimindo o solo. A resistência ao cisalhamento do solo é medida por meio do arrancamento da sonda a uma velocidade controlada (Figura 16).

Figura 16 - Equipamento utilizado no ensaio *Borehole Shear Test*.



Fonte: adaptado de *Handy Geotechnical Instruments* (2019).

Primeiramente, é necessário realizar um furo no solo utilizando-se trados pedológicos (Figura 17a). Segundo Lutenegeger (1987), a superfície do solo em torno do furo deve ser plana e perpendicular ao eixo do equipamento BST, de forma a suportar a base da placa (Figura 17b).

De acordo com *Handy Geotechnical Instruments*, o ensaio pode ser realizado em diversas profundidades na mesma perfuração, ou na mesma profundidade inserindo a sonda de cisalhamento e a rotacionando em 90° para cada tensão normal aplicada.

Figura 17 - Ensaio BST: a) trado pedológico; b) montagem do equipamento, modelo A103.



Fonte: Autora.

Após posicionar a sonda de cisalhamento no interior do furo, aplica-se a tensão normal (σ) na parede acionando a bomba manual até a tensão desejada (Figura 17b). O incremento de tensão recomendado pelo fabricante é apresentado no Quadro 1. Deve-se manter a tensão normal enquanto o solo é consolidado para cada estágio do ensaio.

Quadro 1 - Valores indicados para incremento de tensão normal entre estágios.

Solo	Descrição	Tensão normal [kPa]
Muito mole	Silte muito mole, argila quase no limite de liquidez, areia solta no limite crítico de vazios, ou acima dele	5
Mole	Argila, silte mole ou areia solta	10
Médio	Areia ou silte moderadamente densos ou argila média	20
Duro	Areia, silte ou argila densa	50
Muito duro	Areia cimentada ou argila altamente pré-consolidada	100
Desconhecido	-	35

Fonte: *Handy Geotechnical Instruments* (2019).

O tempo de consolidação deve ser sempre superior a cinco minutos. De acordo com as instruções do fabricante, em solos argilosos e siltes saturados deverá ser aguardado quinze minutos para a consolidação após a aplicação da tensão normal, em solos arenosos e não saturados um tempo de consolidação de cinco minutos é suficiente (LUTENEGGER, 1987).

Depois da consolidação, rotaciona-se a manivela a uma velocidade controlada de duas rotações por segundo a fim de iniciar o arranque da sonda cisalhante, permitindo, assim, a leitura da tensão cisalhante (τ). Quando atingir a tensão cisalhante máxima ($\tau_{\text{máx}}$), indica-se que ocorreu a ruptura, então, é finalizada a leitura do primeiro estágio.

Em continuidade ao ensaio, o próximo estágio ocorre com o incremento de tensão na bomba manual, aguardando o tempo de consolidação e repetindo os procedimentos descritos, a fim de se obter as demais tensões cisalhantes para composição da envoltória de ruptura.

A obtenção dos parâmetros de resistência do solo, c e ϕ , é realizada de maneira análoga à do ensaio de Cisalhamento Direto, por meio do método de Mohr-Coulomb, os quais são plotados os resultados obtidos em cada estágio em um gráfico de tensão cisalhante (τ) *versus* tensão normal (σ).

Em pesquisas realizadas com a finalidade de verificar a precisão dos resultados do ensaio, Lutenecker e Timuan (1987) elencaram os principais aspectos que podem levar ao erro ou à falta de precisão na execução do ensaio:

- Variabilidade do solo natural: ensaios em solos não uniformes geram, automaticamente, resultados variáveis;
- Variabilidade do equipamento: não deve ser realizada a utilização de equipamento ou procedimentos fora do padrão. Erros de resultado por falta de calibração estão relacionados ao uso excessivo do equipamento sem a devida manutenção;
- Variabilidade do operador: ensaios que requerem uma extensa experiência do operador ou são complexos de serem executados devem ser evitados em trabalhos rotineiros;
- Variabilidade na interpretação dos dados: em ensaios que requerem complexas interpretações dos resultados para se obter o valor final podem ser causados erros.

Segundo os autores, a principal preocupação é em relação à variabilidade do operador e do solo a ser estudado, uma vez que os demais pontos podem ser minimizados com a utilização de calibrações e manutenções regulares. No entanto, com realizações de sucessivos ensaios com diferentes operadores, os autores confirmaram haver pequena variabilidade de resultados, independente da experiência do operador com o uso do equipamento, uma vez que não há dificuldade quanto à execução ou leitura dos dados.

Estudos com base na inundação do furo foram realizados para se assemelharem a um ensaio inundado como o Cisalhamento Direto. Quanto à execução do ensaio inundado descrita

por Khoury e Miller (2006), pouco se difere da execução convencional, alterando-se apenas que, para ensaios inundados, os pratos de cisalhamento são rotacionados em 90° da orientação utilizada antes de inundar, e para que o furo se mantenha inundado a água é constantemente adicionada até a submersão da profundidade ensaiada e dos pratos de cisalhamento.

Quando o furo é inundado com água, ocorre a tendência do solo não saturado da margem se tornar aproximadamente saturado ($S_r \approx 100\%$), eliminando-se com isso a parcela de sucção presente no solo. O estudo não chegou a conclusões quanto à extensão (profundidade) do umedecimento do solo (saturação), entretanto, corroborou que o solo terá sua resistência ao cisalhamento reduzida pela ação da inundação (KHOURY; MILLER, 2006).

Ressalta-se, assim, tal qual pode ser obtido nos ensaios laboratoriais de resistência ao cisalhamento, os valores de coesão determinados pelo ensaio BST inundado sempre serão menores que os obtidos pelo ensaio BST com o solo em seu teor de umidade natural.

2.1.6.3.1 Uso do *Borehole Shear Test* no Brasil

Foram adquiridos pelo Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em 2014, dois equipamentos para realização do ensaio BST. Esses são os únicos equipamentos no país que se tem conhecimento até a presente data, nesse sentido, o ensaio não foi amplamente difundido nacionalmente, e devido sua utilização ser relativamente recente, há um pequeno número de estudos que obtiveram em campo os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. Dessa forma, foi realizado um levantamento das pesquisas que utilizaram o BST.

Dentre as de graduação, têm-se os trabalhos de conclusão do curso de Engenharia Civil (CAMPOS, 2015; RIGOTTI, 2019; MATTOS, 2021) e de Geologia (SALUM, 2019; SILVA, 2019) da Universidade Federal de Santa Catarina e de conclusão do curso de Engenharia Sanitária do Centro de Educação Superior do Alto Vale do Itajaí da Universidade do Estado de Santa Catarina (SCHWARZ, 2016; PAUL, 2017).

Campos (2015) tinha como objetivo verificar a variação do Fator de Segurança da estabilidade global de um talude de solo residual de diabásio localizado no bairro Itacorubi, em Florianópolis/SC, utilizando o *software Slide*; enquanto Rigotti (2019) utilizou o *software Macstars* em um talude de cambissolo com substrato de depósito de encosta, na mesma bacia

hidrográfica. Salum (2019) tinha como objetivo definir os condicionantes geológicos e geotécnicos para reavaliar a estabilidade de um talude rodoviário em Cacupé, localizado em Florianópolis/SC, para isso, realizou ensaios de caracterização e determinação dos parâmetros de resistência do solo residual de granito e de diabásio e realizou análise de estabilidade com o *software Geoslope*. Silva (2019), por sua vez, tinha como objetivo principal caracterizar geologicamente e geotecnicamente a encosta deslizada do morro da praia Mole, em Florianópolis/SC, e realizar retroanálise do deslizamento de solo que ocorreu no local em janeiro de 2018, por meio do *software GeoStudio* com o uso da ferramenta *Slope/W*. Em campo, foi executado o ensaio *Borehole Shear Test* (BST) e realizada coleta de amostras deformadas para execução de ensaios de caracterização do solo em laboratório.

Schwarz (2016) realizou modelagem de áreas suscetíveis a deslizamento translacional raso no município de Ibirama/SC por meio do modelo de estabilidade de encostas denominado TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability Analysis*). Para isso, elaborou um inventário de cicatrizes e mapeamento geotécnico, o qual foi utilizado para definir os locais dos ensaios BST e coletadas amostras para ensaios de granulometria. Assim como Paul (2017), que tinha como objetivo a identificação das áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos nas bacias hidrográficas do Taboão e Bela Aliança, em Rio do Sul/SC, também com a aplicação do modelo TRIGRS.

Mattos (2021), em seu trabalho denominado “estado da arte: estudos internacionais sobre o ensaio *Borehole Shear Test*”, realizou um levantamento de trabalhos publicados em revistas e acervos científicos em português ou inglês, no exterior, utilizando o BST. Dos 55 documentos levantados, 46 foram produzidos nos EUA, 3 na China e 1 na Alemanha, na Itália, na Bulgária, no Japão, em Taiwan e na Coreia do Sul. O autor, ainda, compilou em tabelas os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de diferentes solos obtidos por meio do ensaio BST em 19 do total de trabalhos levantados.

Em relação às dissertações de mestrado, têm-se Caraméz (2017), que submeteu o trabalho ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Zimmermann (2019) e Flach (2020), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Caraméz (2017) objetivou o desenvolvimento de mapas geotécnicos e de suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas por meio do modelo matemático SHALSTAB

na bacia hidrográfica do Itacorubi, em Florianópolis/SC. O autor caracterizou os solos da área de estudo e estimou seus respectivos parâmetros de resistência, por meio de ensaios laboratoriais e de campo (*Borehole Shear Test* - BST e *Standard Penetration Test* - SPT). Para a análise de suscetibilidade, os parâmetros de resistência dos solos foram espacializados por meio do método da krigagem. Em contrapartida, Zimmermann (2019) tinha como objetivo mapear as áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais utilizando o modelo SHALSTAB, e rotacionais, por meio do Fator de Segurança, das bacias hidrográficas do Rio Cachoeira e do Rio da Prata no município de Joinville/SC.

Flach (2020) tinha como objetivo geral comparar os dados obtidos pelo ensaio *Borehole Shear Test* e Cisalhamento Direto na caracterização e mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, Ilhota/SC, por meio do modelo SHALSTAB. Os parâmetros utilizados na modelagem foram espacializados por meio de três cenários: por unidade geotécnica, média simples e o menor valor.

Por fim, entre os trabalhos de doutorado, têm-se as teses submetidas ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (CHRIST, 2019) e submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MICHEL, 2015).

Christ (2019) tinha como objetivo aprimorar a escala do mapeamento geotécnico e gerar um mapa de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais a partir do Fator de Segurança, e translacionais, com o uso do SHALSTAB, para a Ilha de Santa Catarina, além de implementar um banco de dados georreferenciados em SIG com parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por meio dos ensaios BST e SPT. Michel (2015) tinha como objetivo propor e testar um modelo de estimativa da profundidade máxima do solo, com base em características hidrológicas, pedológicas e geomorfológicas, denominado Modelo de Estimativa da Máxima Profundidade do Solo (MEMPS). O mapa de profundidade do solo das encostas elaborado com o MEMPS foi utilizado no TRIGRS para delimitação de áreas suscetíveis a deslizamento. Para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, foi realizado o ensaio BST.

Ainda, observou-se o artigo publicado na revista *Brazilian Applied Science Review* no qual foi realizada a elaboração do mapeamento geoambiental e análise de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais e rotacionais na bacia hidrográfica do Rio do Tigre em Joaçaba/SC. A análise quanto aos deslizamentos rotacionais foi por meio de simulações

utilizando o *software Macstars*, considerando o método de Bishop, e quanto aos deslizamentos translacionais empregou-se o modelo SHALSTAB, com superfície de ruptura de 5 metros.

Na Tabela 1, é possível observar os dados referentes à execução dos ensaios BST pelos referidos autores, bem como os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos.

Tabela 1 - Trabalhos que utilizaram o BST para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.

Município	Tipo de solo	Tempo de consolidação [minutos]	Prof. [cm]	Tensão Normal [kPa]		Tensão Cisalhante [kPa]		Intercepto coesão [kPa]		Ângulo de atrito [graus]		Fonte
				Natural	Inundado	Natural	Inundado	Natural	Inundado	Natural	Inundado	
Florianópolis	Residual de granito	5	50	25/50/100	-	34/53/80	-	21,0	-	31	-	Campos (2015)
		15	100	25/50/100	-	20/30/55	-	7,5	-	28	-	
		15	150	25/50/100	-	26/42/62	-	16,0	-	24	-	
		15	200	25/50/100	-	20/36/57	-	9,5	-	27	-	
Florianópolis	Residual de granito	5	100	-	25/50/100	-	30/49/74	-	17,5	-	30	Salum (2019)
		5	200	-	25/50/100	-	34/56/86	-	19,0	-	34	
		5	100	-	25/50/100	-	29/43/82	-	9,5	-	36	
		5	200	-	25/50/100	-	28/48/62	-	21,0	-	23	
		5	100	-	25/50/100	-	30/49/71	-	19,0	-	28	
Florianópolis	Residual de granito	5	150/ 130	-	25/50/100	-	26/54/88	-	9,0	-	39	Silva (2019)
Florianópolis	Depósito de encosta	15/10/10/10	NI	-	20/40/60/80	-	20/28/38/54	-	7,0	-	29	Rigotti (2019)
Ibirama	Residual de gnaisse*	20/5/5/5/5	55	-	20/40/60 /80/100	-	NI	-	1,7	-	23	Schwarz (2016)
		20/5/5/5/5	55	-	20/40/60 /80/100	-	NI	-	1,6	-	19	
		20/5/5/5	55	-	20/40/60/80	-	NI	-	1,5	-	26	
	Residual de argilito*	20/5/5/5	55	-	20/40/60/80	-	NI	-	2,0	-	15	
	20/5/5/5	55	-	20/40/60/80	-	NI	-	1,5	-	18		
20/5/5	55	-	20/40/60	-	NI	-	4,7	-	13			
Rio do Sul	Residual de folhelho e siltito*	20	60	40/60/80/100	40/60/80	NI	NI	3,3	10,7	43	19	Paul (2017)
	Residual de arenito e siltito*	20	60	40/60/80/100	20/30/40/50	NI	NI	4,0	2,2	32	28	
		20	60	40/60/80/100	20/30/40/50	NI	NI	1,0	1,4	37	33	
	Sedimentos quaternários*	20	60	40/60/80/100	20/30/40/50	NI	NI	6,6	3,6	43	28	

Município	Tipo de solo	Tempo de consolidação [minutos]	Prof. [cm]	Tensão Normal [kPa]		Tensão Cisalhante [kPa]		Intercepto coesão [kPa]		Ângulo de atrito [graus]		Fonte
				Natural	Inundado	Natural	Inundado	Natural	Inundado	Natural	Inundado	
Florianópolis	Residual de granito	15/5/5	100/120	50/78/115	50/75/100	52/76/96	42/58/72	20,4	12,3	34	31	Caraméz (2017)
		15/5/5	40/80	48/72/102	22/42/70/90	40/56/64	25/30/44/54	21,0	13,8	24	24	
		15	80/100	50/75/100	25/50/75/100	68/68/92	20/38/48/60	40,0	9,0	26	27	
		15	100/120	50/75/100	25/50/75/100	52/60/82	28/42/55/78	19,7	10,0	31	33	
		15	80/100	50/75/100	25/50/75/100	50/60/76	24/30/48/62	23,0	8,0	27	28	
		15/5/5	60/80	47/73/104	26/50/73/100	46/59/80	19/32/43/52	16,9	8,7	31	24	
Joinville	Residual de gnaisse	NI	100	-	NI	-	NI	-	6,8	-	NI	Zimmermann (2019)
		NI	100	-	NI	-	NI	-	6,3	-	27	
		NI	100	-	NI	-	NI	-	9,6	-	30	
		NI	100	-	NI	-	NI	-	8,1	-	NI	
		NI	100	-	NI	-	NI	-	8,8	-	30	
		NI	100	-	NI	-	NI	-	5,8	-	NI	
	Sedimentos quaternários	NI	100	-	NI	-	NI	-	0,6	-	32	
		NI	100	-	NI	-	NI	-	11,8	-	28	
Florianópolis	Residual de granito	15/5/5/5	100	-	20/40/60/80	-	NI	-	8,8	-	34	Christ (2019)
		15/5/5/5	100	-	20/40/60/80	-	NI	-	17,2	-	22	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	19,8	-	11	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	7,6	-	20	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	18,1	-	21	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	7,5	-	45	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	2,7	-	23	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	18,0	-	19	
		15/5/5/5/5	40	-	20/40/60/80/100	-	18/30/34/52/60	-	7,0	-	28	
		15/5/5/5/5	40	-	20/40/60/80/120	-	18/25/28/40/42	-	14,0	-	14	
15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	12,0	-	22			

Município	Tipo de solo	Tempo de consolidação [minutos]	Prof. [cm]	Tensão Normal [kPa]		Tensão Cisalhante [kPa]		Intercepto coesão [kPa]		Ângulo de atrito [graus]		Fonte
				Natural	Inundado	Natural	Inundado	Natural	Inundado	Natural	Inundado	
	Residual de diabásio	15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	7,1	-	19	
	Depósito de encosta	15/5/5/5/5	40	-	20/40/60/80/100	-	16/21/36/40/55	-	4,8	-	25	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	12,8	-	28	
	Sedimentos quaternários	15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	6,7	-	26	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	12,9	-	23	
		15/5/5/5	40	-	20/40/60/80	-	NI	-	4,6	-	29	
Florianópolis	Residual de diabásio	5	80	-	25/50/100	-	20/30/60	-	5,0	-	28	LAMGEO (2016)
	Residual de folhelho	15	55/100	-	30/70/100	-	NI	-	6,2	-	27	
Ilhota	Residual de arenito	15	55/100	-	32/64/100	-	NI	-	9,8	-	25	Flach (2020)
	Residual de gnaisse	15	55/100	-	30/60/100	-	NI	-	2,3	-	30	
	Residual de piroxenito	15	55/100	-	30/60/90	-	NI	-	8,0	-	29	
Joaçaba	Residual de basalto	NI	NI	-	NI	-	NI	-	3,3	-	22	
	Residual de basalto	NI	NI	-	NI	-	NI	-	5,5	-	18	
	Residual de basalto	NI	NI	-	NI	-	NI	-	0,0	-	26	Luvizão <i>et al.</i> (2020)
	Residual de basalto	NI	NI	-	NI	-	NI	-	0,7	-	27	
	Residual de basalto	NI	NI	-	NI	-	NI	-	1,0	-	25	

NI - Não informado; * - dados obtidos a partir do mapa geológico, em escala 1:100.000, do Projeto GERCO (KAUL; FERNANDES; SANTOS NETO, 2002).
Fonte: elaborado pela Autora.

2.1.7 Comparação entre os métodos de execução dos ensaios de Cisalhamento Direto, Compressão Triaxial e *Borehole Shear Test*

Em relação à coleta de amostra de solo para execução dos ensaios laboratoriais, em geral, necessita-se de condições mais específicas, como a execução de banquetas em um talude ou trincheira. Quando o solo é coletado em bloco, há necessidade de uma maior perfuração (Figura 18), quando a amostra é coletada nos moldes do corpo de prova, a coleta é mais simplificada (Figura 19). Em contrapartida, no ensaio BST, além de não necessitar a coleta de amostra de solo, a determinação do local para execução do ensaio é facilitada, incluindo-se terrenos planos.

Observa-se que o procedimento de coleta de amostras para os ensaios laboratoriais induz condições não idênticas àquelas no ambiente natural. Isso se deve ao fato de ocorrer alívio de tensões no volume de solo coletado. Além disso, apesar de nomear-se a coleta como indeformada, segundo Long (1998), sempre haverá algum tipo de perturbação, mesmo que mínima, durante amostragem do solo, especialmente os não coesivos. Nesse sentido, principalmente para o ensaio de Cisalhamento Direto, a coleta e moldagem dos corpos de prova devem ser realizadas com cautela, pois esse ensaio impõe uma superfície de ruptura às amostras e alterações na estrutura do solo podem prejudicar a confiabilidade dos resultados (CARAMEZ, 2017). Desse modo, o BST mostra-se vantajoso, uma vez que é executado em campo.

Figura 18 - Coleta de amostras de solo em bloco indeformado em a) poço de inspeção e b) talude.



Fonte: Silva (2015).

Figura 19 - Coleta de amostras de solo no molde do ensaio de Cisalhamento Direto em taludes.



Fonte: Autora.

Observa-se que o procedimento de coleta de amostras para os ensaios laboratoriais induz condições não idênticas às aquelas no ambiente natural. Isso se deve ao fato de ocorrer alívio de tensões no volume de solo coletado. Além disso, apesar de nomear-se a coleta como indeformada, segundo Long (1998), sempre haverá algum tipo de perturbação, mesmo que mínima, durante amostragem do solo, especialmente os não coesivos. Nesse sentido, principalmente para o ensaio de Cisalhamento Direto, a coleta e moldagem dos corpos de prova devem ser realizadas com cautela, pois esse ensaio impõe uma superfície de ruptura às amostras e alterações na estrutura do solo podem prejudicar a confiabilidade dos resultados (CARAMEZ, 2017). Desse modo, o BST mostra-se vantajoso, uma vez que é executado em campo.

Durante o transporte e manuseio dos corpos de prova para os ensaios em laboratório podem ocorrer, ainda, variações de umidade, temperatura, estado de tensões etc., dessa forma, necessitam-se cuidados para evitar a perturbação da amostra de solo (CARAMEZ, 2017). Alguns procedimentos podem ser realizados para mitigar as perturbações nas amostras durante o transporte até o laboratório, como envolvê-las em filme plástico e, quando necessário uso de parafina, acondicioná-las em caixas de madeira ou isopor preenchidas com serragem ou solo.

Para o ensaio BST, apesar de Lutenegeger e Hallberg (1981) observarem que o efeito da perturbação no furo ainda não é conhecido, entende-se que a interferência nas paredes do furo pode ser menor do que a perturbação que a amostra de solo sofre durante a coleta, transporte e manuseio do corpo de prova em laboratório.

Em relação ao uso do BST em solos moles, Mitchell (1979) concluiu que o ensaio é mais adequado em argilas mais rígidas, pois pode ocorrer dificuldade em relação à manutenção da abertura do furo.

Na execução da coleta de amostras do solo e execução dos ensaios, destaca-se que os ensaios de Cisalhamento Direto e BST são de simples compreensão e não requerem experiência do operador, em contrapartida, o ensaio de Compressão Triaxial é considerado relativamente complexo, necessitando instruções mais detalhadas e um operador experiente.

Nesse sentido, Lutenegger e Timian (1987) analisaram a variabilidade dos resultados obtidos por meio do BST conduzidos por diferentes operadores. Os autores observaram, em relação à média dos resultados obtidos por cada operador para os parâmetros de resistência, uma pequena variação no ângulo de atrito, de 1,5° (variou de 25,4 a 23,9°), e uma variação maior para intercepto coesivo, de 13,9kPa (5,4 a 19,3kPa). Por meio de testes de hipóteses, para um intervalo de confiança de 95%, observaram-se que não houve diferença significativa entre os resultados obtidos por diferentes operadores. Dessa forma, os autores concluíram que, somente com um conhecimento mínimo do procedimento, foi possível obter resultados satisfatórios dos ensaios (LUTENNEGER; TIMIAN, 1987).

Outro ponto relevante é o tempo de execução dos ensaios. Nesse aspecto, os ensaios de laboratório apresentam-se mais relacionados à experiência do operador, uma vez que operadores com maior prática realizam a coleta e moldagem dos corpos de prova com maior rapidez, ainda que de forma cautelosa. Para comparação entre os três ensaios, elaborou-se a Tabela 2 com uma estimativa do tempo necessário, sem grande rigor, para execução de cada etapa. Importante ressaltar que o tempo foi estipulado de modo genérico e que não foi contabilizado o tempo de montagem e desmontagem dos equipamentos, troca de corpos de prova para execução de cada estágio e reposicionamento da sonda cisalhante, no caso do BST.

Tabela 2 - Tempo genericamente estimado de execução para as etapas de cada um dos ensaios.

		<i>Borehole Shear Test</i>	Cisalhamento Direto	Compressão Triaxial
Preparação para o ensaio	Preparação do terreno	10 min.	20 min.	20 min.
	Tradagem	50 min.	-	-
	Coleta de amostra	-	2 horas	2 horas
	Transporte	-	variável	variável
	Moldagem do corpo de prova	-	20 min./corpo de prova	20 min./corpo de prova
Execução do ensaio	<i>Estágio 1</i>			
	Saturação	-	-	24 horas
	Consolidação do solo	15 min.	2 horas	1 hora

		Execução do ensaio	5 min.	40 min.	1 hora
	<i>Estágio 2</i>	Saturação	-	-	24 horas
		Consolidação do solo	5 min.	6 horas	1 horas
		Execução do ensaio	5 min.	40 min.	1 hora
	<i>Estágio 3</i>	Saturação	-	-	24 horas
		Consolidação do solo	5 min.	12 horas	1 horas
		Execução do ensaio	5 min.	40 min.	1 hora
Tempo total:			1 hora e 40 minutos	25 horas e 20 minutos	3 dias, 9 horas e 20 minutos

Fonte: elaborado pela Autora.

A partir da Tabela 2, observou-se uma diferença significativa em termos de horas despendidas para cada ensaio. Ainda que a maior parte do tempo necessário para a execução dos ensaios de laboratório seja referente à saturação e à consolidação dos corpos de prova, o tempo para obtenção dos parâmetros por esses ensaios é expressivo em relação ao BST, principalmente o ensaio de Compressão Triaxial. Cabe destacar que a Tabela 2 foi construída com valores de tempos genéricos e que pode ser bem variável, principalmente para o ensaio de Compressão Triaxial, que o tempo de execução está relacionado ao tipo de solo (mais argiloso ou arenoso) e do tipo de condição de drenagem e tensões normais aplicadas.

Dessa forma, o ensaio BST apresenta-se como uma alternativa quando se objetiva fornecer parâmetros de resistência de solos de maneira ágil e com maior abrangência do terreno pesquisado. Assim, podem-se realizar ensaios em um maior número de pontos, possibilitando uma caracterização mais fidedigna do subsolo.

Em relação ao equipamento, a maior vantagem do ensaio BST em comparação aos ensaios de laboratório é a portabilidade do equipamento e ao fato de não requerer fontes de energia externas ou acessórios de perfuração especializados (Figura 20). Ainda, é possível inspecionar as camadas de solo durante a execução da tradagem, a qual auxilia na escolha das profundidades para realização do ensaio. Para análise da estabilidade dos taludes na bacia hidrográfica em estudo, por exemplo, os ensaios foram executados no horizonte C do solo.

Figura 20 - Equipamento BST e trado pedológico para execução do ensaio.



Fonte: Autora.

Em contrapartida, o incremento da tensão cisalhante durante a execução do ensaio é por meio do arranque da sonda cisalhante realizado manualmente com a rotação de uma manivela, que deverá ser de duas rotações por segundo, conforme instrução do fabricante, dessa forma, há certa subjetividade na execução do ensaio BST.

Nesse contexto, Bechtum (2012) estudou a possibilidade de automatização do ensaio, com objetivo de reduzir possíveis erros gerados pelos operadores e ampliar o fornecimento de dados, que tornaria possível a realização de testes cíclicos. O autor desenvolveu um equipamento automatizado acoplado ao BST convencional, o qual permitiu a aquisição em tempo real de leituras das tensões normais e cisalhantes e o processamento dos resultados em um *software* específico.

Quanto à execução do ensaio, cita-se como desvantagem do Cisalhamento Direto, apontada por Ortigão (2007), a imposição do plano de ruptura. Segundo o autor, quando se trata de ensaiar solos homogêneos, pode-se incorrer no erro de se moldar o corpo de prova segundo a direção de maior resistência, obtendo-se, assim, resultados desfavoráveis à segurança. No ensaio de Compressão Triaxial, a superfície de ruptura tem maior grau de liberdade, podendo romper-se livremente, o qual simula com mais exatidão as condições no campo.

Bem como o ensaio BST que, de acordo com Lutenegger e Hallberg (1981), pode ser executado em qualquer direção desde que possa ser feito um furo no solo. Em sua pesquisa, os

autores utilizaram o BST horizontalmente em cortes de estrada e nas laterais de minas, e invertido para analisar a resistência no teto de um túnel.

Lohnes e Handy (1968) utilizaram o BST para avaliar encostas naturais de alta declividade em solo *Loess*. Foram realizados diversos ensaios nas direções vertical e horizontal, nos quais foi possível constatar que, na maioria dos locais, não houve uma diferença tão significativa nos valores de coesão e ângulo de atrito. Portanto, considerando-se a dificuldade envolvida na perfuração e execução do ensaio na posição horizontal, é justificável que se priorize a execução do ensaio na vertical. Outra questão a se considerar é que, de acordo com os autores, não foi possível comprovar se essa variação é decorrente da heterogeneidade ou da anisotropia do solo.

O furo pode ser realizado, ainda, na posição inclinada, dessa forma, uma das aplicações mais versáteis para o BST tem sido na determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos em análises de estabilidade de taludes, pois o BST pode ser executado diretamente na superfície de ruptura. Nesse sentido, Handy (1986), que obteve 14 envoltórias de ruptura em apenas dois dias, analisou três deslizamentos em Iowa, nos Estados Unidos, por meio da realização do ensaio BST nas zonas de rupturas. O autor observou que o valor de coesão após a ocorrência dos deslizamentos apresentou-se próximo de zero, sugerindo que o equilíbrio pós-deslizamento deve derivar, principalmente, do atrito interno entre os grãos.

Na execução dos ensaios, uma das desvantagens do BST é que não fornece dados das deformações horizontais e verticais nem se tem como controlar a condição de drenagem do corpo de prova, logo, o ensaio não fornece valores de pressão neutra, diferentemente do ensaio de Compressão Triaxial, no qual a pressão neutra pode ser medida durante a ruptura.

Os ensaios BST e de Cisalhamento Direto devem ser executados a uma velocidade compatível àquela que o solo irá experimentar naturalmente ou que garanta a dissipação das pressões neutras, de forma a se obter a resistência efetiva do solo. A condição imposta para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo dependerá da finalidade do estudo. Para o caso de se analisar a resistência à ruptura de um talude de solo argiloso, que possui baixa permeabilidade, o rompimento deverá ser de forma lenta e a condição que se busca é a consolidada não drenada, uma vez que a velocidade com que a ruptura acontecerá em campo não permitirá a dissipação das pressões neutras. Em contrapartida, para taludes de solo arenoso, a velocidade do rompimento pode ser maior, a condição de ensaio deverá ser consolidada

drenada, pois, nesse caso, a permeabilidade do solo é alta o suficiente para permitir que a ruptura ocorra de forma drenada, ou seja, permitirá a dissipação das pressões neutras pelo solo mais granular (CONTESSI, 2016).

Lutenegger e Hallberg (1981) relatam que, em muitos casos, os resultados de BST tendem a se equiparar aos resultados dos ensaios de laboratório, sobretudo quando executados em condição consolidada drenada. Os autores mencionam que em solos arenosos e solos coesivos secos os valores são mais próximos aos resultados obtidos em laboratório quando executados como consolidado drenado.

Entretanto, Bechtum (2012) destaca a importância de estudos mais aprofundados para a afirmação de condição de drenagem principalmente em solos argilosos, uma vez que a condição drenada ou não drenada é muitas vezes simplesmente assumida. O autor sugere a incorporação de um transdutor de pressão de água para indicação de variação de poropressão.

Em relação à execução do ensaio BST, uma das vantagens é que os resultados dos estágios podem ser analisados em campo, permitindo ao operador avaliar a necessidade ou substituição de pontos a serem plotados no gráfico tensão normal *versus* tensão cisalhante. Entre as anomalias ou inconsistências reveladas ao longo da execução do ensaio, nos procedimentos do fabricante (*Handy Geotechnical Instruments*, 2019) citam-se:

- *Desenvolvimento de excesso de poropressão*: identificado devido a envoltória apresentar estabilização formando curva para baixo ou tendência à queda. Para solucionar, deve-se aumentar o tempo de consolidação para os próximos estágios. Para assegurar a drenagem, altera-se curtos e longos tempos de consolidação (5 e 10 minutos) e observa-se se as envoltórias coincidem.
- *Intercepto coesivo negativo em areias*: areias localizadas abaixo do aquífero freático podem apresentar coesão negativa, uma vez que a pressão da água se opõe à tensão normal aplicada. Esse valor, caso seja baixo, pode ser desconsiderado. A correção é feita subtraindo a pressão da água. Outra causa pode ser devido ao aumento da resistência final ao movimento da placa de cisalhamento, que pode inclinar a envoltória na direção correta. O erro é pequeno e normalmente pode ser negligenciado, iniciando-se novas leituras.

Por fim, ressalta-se que ainda não existe norma específica para execução do ensaio BST, sendo recomendado o procedimento descrito pelo fabricante. Ainda, pode-se dizer que o ensaio é relativamente novo, ou ao menos pouco difundido no meio acadêmico, portanto, há

escassez de dados para a realização de estudos comparativos e correlações entre os diferentes tipos de solos. Nesse contexto, os ensaios de laboratório, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial, apresentam maior número de estudos, o que lhes assegura maior confiabilidade dos resultados.

Entretanto, de acordo com Lutenecker e Hallberg (1981), devido ao tempo, economia e precisão desse ensaio, o equipamento BST deve ter maior uso no futuro como ensaio geotécnico *in situ*. Nesse contexto, acredita-se que o BST pode ser utilizado de forma satisfatória e representativa da área de estudo quando associado ao mapeamento geotécnico para o estudo de estabilidade de encostas.

2.1.8 Estudos comparativos entre os ensaios de Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial com o *Borehole Shear Test*

Alguns autores, principalmente norte-americanos, têm realizados pesquisas comparando o ensaio de campo, *Borehole Shear Test* (BST), com os ensaios de cisalhamento executados em laboratório. Contudo, cabe ressaltar que, para todos os estudos citados nesta pesquisa, os corpos de prova ensaiados em laboratório foram obtidos de amostras indeformadas de solo coletadas em campo.

Irigoyen e Coduto (2015) compararam, para uma variedade de solos, os resultados obtidos pelo ensaio BST com os obtidos em laboratório, por meio dos ensaios de Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial, nas condições natural e inundada. De acordo com os autores, foi observada concordância aceitável entre os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos pelo BST e aqueles obtidos pelos ensaios laboratoriais. Para eles, o equipamento BST possui potencial para fornecer dados em campo de qualidade a um custo razoável.

Kobayashi *et al.* (2012) modificaram o equipamento do BST para execução do ensaio em amostras de solo lunar, com o intuito de auxiliar no programa de exploração lunar SELENE-2, e compararam os resultados com ensaios de Compressão Triaxial e de Cisalhamento Direto. Segundo os autores, os resultados dos parâmetros de resistência apresentados pelos três ensaios apresentaram-se valores em concordância.

Khoury e Miller (2006) realizaram uma comparação entre o ensaio de Compressão Triaxial multi-estágios e ensaios BST realizados em campo, nas condições natural e inundada. Os autores observaram que os valores de ângulo de atrito obtidos pelo BST em solos não saturados foram maiores, e para intercepto coesivo menores, do que os obtidos pelos ensaios de Compressão Triaxial executados sob valores similares de tensão normal. Em contrapartida, em comparação ao BST inundado os valores dos parâmetros de resistência foram consideravelmente distintos, principalmente, em relação aos valores de ângulo de atrito, que se apresentaram muito maiores nos ensaios de Compressão Triaxial.

Segundo Handy e Fox (1967), comparações entre o ensaio BST e os ensaios de laboratório Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial na condição consolidada não drenada indicaram boa concordância entre os resultados dos parâmetros de resistência para areias, siltes e argilas.

Yang (2005) comparou as médias dos valores de resistência ao cisalhamento de solos divididos em dois grupos - camada de sedimentos quaternários aluviais e de folhelhos subjacentes com distintos graus de intemperismo, obtidos por meio do ensaio realizado em campo, BST, e em laboratório, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial. No total, foram realizados 29 ensaios BST, 20 ensaios de Cisalhamento Direto consolidados drenados e 6 ensaios de Compressão Triaxial consolidados não drenados. As médias dos valores obtidas em cada tipo de ensaio para as camadas de solos estão apresentadas nas Tabelas 3 - entre os ensaios BST e Cisalhamento Direto e Tabela 4 - entre os ensaios BST e Compressão Triaxial.

De acordo com o autor, os resultados dos ensaios mostram que os valores de resistência ao cisalhamento para cada camada de solo não correspondem perfeitamente, embora possuam uma concordância razoável. Ainda, concluiu que a variabilidade do solo poderia ter contribuído para a discrepância entre os resultados obtidos pelos ensaios, pois embora os ensaios BST tenham sido realizados no mesmo local ou muito próximo dos locais de coleta das amostras indeformadas para os ensaios de Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial, o solo ensaiado em campo pode não ser idêntico aos ensaiados em laboratório.

Bechtum (2012) comparou o ensaio de Cisalhamento Direto (CD) a uma versão automatizada do *Borehole Shear Test* (BST). Dessa forma, a tensão normal e de cisalhamento são aplicadas de forma automática, não necessitando de rotação da manivela e bomba manual. Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios e sua variação (V) para dois tipos de

solos distintos. Observa-se maior variação entre os valores de coesão nas areias glaciais. Em contrapartida, a variação (V) dos valores de ângulo de atrito interno é menos significativa.

Assim como Ashlock e Lu (2012), que realizaram uma comparação entre os resultados da versão automatizada do BST executado em campo em 5 profundidades e o ensaio de Cisalhamento Direto executado em laboratório em solos siltosos não saturados. Para os autores, os resultados dos ensaios apresentaram-se similares, principalmente em relação ao ângulo de atrito. Conforme se pode observar na Tabela 3, a máxima variação (V) entre os valores do ângulo de atrito nos ensaios foi de 4°. Em relação à coesão, a variação foi maior e os valores obtidos foram consideravelmente mais baixos nos ensaios BST.

Lambrechts e Rixner (1981) compararam os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos de silte e silte variado por meio dos ensaios em laboratório de Compressão Triaxial e de campo *Borehole Shear Test* (BST) e *Cone Penetration Test* (CPT). Em relação aos resultados dos ensaios de Compressão Triaxial, em condição consolidada não drenada (CU), e BST, os autores afirmaram que apresentaram valores próximos, principalmente o ângulo de atrito, com variação de 4° entre os ensaios (Tabela 4). Os autores afirmam que essa variação (V) pode estar relacionada ao possível adensamento do solo durante a coleta e transporte dos corpos de prova para a realização do ensaio em laboratório.

Tabela 3 - Comparação entre os resultados de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e *Borehole Shear Test* (BST).

Tipo de solo	Prof. do ensaio BST (m)	Coesão [kPa]			Ângulo de atrito [graus]		
		CD	BST	V	CD	BST	V
Areia glacial ¹	0,70	64,1	31,0	33,1	31,1	36,6	5,5
	1,71	35,2	17,2	18,0	36,6	39,2	2,6
	2,49	23,4	15,8	7,6	34,9	38,2	3,3
Argila mole ¹	1,55	23,4	41,4	18,0	24,8	24,4	0,4
Sedimentos quaternários ²	-	18,8	33,0	14,2	26,5	16,5	10
Residual de folhelho altamente intemperizado ²	-	20,4	33,2	12,8	21,4	12,8	8,6
Residual de folhelho medianamente intemperizado ²	-	23,6	97	73,4	19,4	21,6	2,2
Loess ³	0,35	11,7	2,1	9,6	40,0	41,0	1,0
Loess ³	0,67	15,8	13,4	2,4	39,0	38,0	1,0

Loess ³	0,98	27,3	2,1	25,2	39,0	43,0	4,0
Loess ³	1,57	13,8	2,5	11,3	38,0	40,0	2,0
Loess ³	2,14	7,9	5,8	2,1	37,0	36,0	1,0

Fonte: ¹Bechtum (2012); ²Yang (2005); ³Ashlock, Lu (2012).

Tabela 4 - Comparação entre os resultados de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Compressão Triaxial e *Borehole Shear Test* (BST).

Tipo de solo	Condição do ensaio Triaxial	Coesão [kPa]			Ângulo de atrito [graus]		
		Triaxial	BST	V	Triaxial	BST	V
Silte ¹	CU	0,0	12,9	12,9	36,0	32,0	4,0
Silte variado ¹	CU	0,0	9,6	9,6	33,0	29,0	4,0
Sedimentos quaternários ²	CU	6,5	33,0	26,5	25,0	16,5	8,5
Residual de folhelho altamente intemperizado ²	CU	5,7	33,2	27,5	26,6	12,8	13,8

Fonte: ¹Lambrechts, Rixner (1981); ²Yang (2005).

Em trabalhos realizados no Brasil, Contessi (2016) teve como objetivo analisar a relação entre os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test* em corpos de prova de solo residual de granito homogeneizado e compactado em laboratório. O autor realizou a ruptura em estado de umidade natural e inundado, nas mesmas condições de drenagem e com faixas de tensões normais muito próximas das aplicadas para cada envoltória. Segundo Cotessi (2016), a análise dos resultados mostrou valores dos parâmetros de resistência bastante semelhantes, com envoltórias paralelas e valores de intercepto coesivo próximos. Dessa forma, o autor concluiu que não há desconfiança na validade dos resultados do BST, uma vez que eles se mostraram bastante próximos e coerentes entre si, havendo possíveis variações decorrentes dos procedimentos de ambos os ensaios que poderiam afetar a estrutura do solo.

Sakamoto *et al.* (2016) executaram ensaios BST no mesmo talude em que foram coletados corpos de prova indeformados para a execução do ensaio CD, nos solos das unidades geotécnicas Podzólico Vermelho Amarelo de substrato granito e Gleissolo de substrato sedimentos quaternários aluvionares da bacia hidrográfica do Itacorubi, localizada em Florianópolis (SC). De acordo com os autores, os ensaios executados em estado inundado apresentaram valores similares para o ângulo de atrito, no entanto, para o estado natural e para os valores de coesão ocorreram diferenças significativas.

Sbroglia *et al.* (2018a), analisando os dados obtidos pelos ensaios de Cisalhamento Direto em laboratório e *Borehole Shear Test* em campo, para solos residuais dos estados do Rio de Janeiro (DNIT, 2017) e Santa Catarina (DNIT, 2016), concluíram que as envoltórias de ruptura, em iguais condições de drenagem e tensões normais, apresentaram correlações satisfatórias e, como resultado, obtiveram parâmetros de resistência bastante semelhantes e coerentes com os valores apontados pela literatura para solos residuais. Os autores observaram variações mais significativas entre o parâmetro de coesão.

Flach (2020), por sua vez, executou ensaios BST e CD na condição inundada em diferentes solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, em Ilhota (SC). O ensaio BST foi realizado no mesmo local em que foram coletadas as amostras indeformadas para execução do ensaio CD, em locais próximos ao topo de deslizamento ocorrido em Cambissolos com substrato de arenito, folhelho, gnaiss e piroxenito. Segundo o autor, ocorreu maior variação nos valores de coesão obtidos entre os ensaios, enquanto que os valores de ângulo de atrito foram próximos, com variação máxima de 2,3°.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos por Contessi (2016), Sakamoto *et al.* (2016), Sbroglia *et al.* (2018a) e Flach (2020) para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos pelos ensaios de Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test* realizados nas condições de drenagem natural e inundada.

Tabela 5 - Variação (V) entre resultados de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e *Borehole Shear Test* (BST) em trabalhos realizados no Brasil.

Tipo de solo	Condição do ensaio	Coesão [kPa]			Ângulo de atrito [graus]		
		CD	BST	V	CD	BST	V
Residual de Granito ¹	Inundado	9,4	13,1	3,7	35,7	46,5	10,8
Residual de Granito ¹	Natural	22,8	14,5	8,3	43,5	45,1	1,6
Residual de Granito ²	Natural	7,4	21,0	13,6	38,0	43,1	5,1
Residual de Granito ²	Inundado	3,8	4,0	0,2	34,4	32,6	1,8
Residual de Granito ²	Natural	18,4	9,0	9,4	42,1	26,6	15,5
Residual de Granito ²	Inundado	5,4	1,0	4,4	35,8	35,6	0,2
Residual de Granito ²	Natural	51,3	13,0	38,3	54,2	42,6	11,6
Residual de Granito ²	Inundado	18,2	6,0	12,6	28,8	35,0	6,2
Sedimentos Quaternários ²	Natural	28,3	9,0	19,3	27,0	36,3	9,3

Sedimentos Quaternários ²	Inundado	5,1	0,0	5,1	29,4	35,6	6,2
Residual de Granitóide ³	Inundado	1,0	3,6	2,6	41,5	39,3	2,2
Residual de Gnaisse ³	Inundado	8,3	12,0	3,7	30,2	31,0	0,8
Residual de Migmatito ³	Inundado	15,4	11,0	4,4	29,8	32,0	2,2
Residual de Granito ³	Inundado	13,8	7,0	6,8	36,4	33,3	3,1
Residual de Granulito ³	Inundado	14,7	16,6	1,9	30,8	34,7	3,9
Residual de Riolito ³	Inundado	14,6	26,3	11,7	22,7	23,6	0,9
Residual de Folhelho ⁴	Inundado	13,4	6,2	7,2	27,2	27,1	0,1
Residual de Arenito ⁴	Inundado	16,5	9,8	6,7	24,8	25,3	0,5
Residual de Gnaisse ⁴	Inundado	12,3	2,3	10,0	29,3	30,1	0,8
Residual de Piroxênio ⁴	Inundado	7,0	8,0	1,0	31,1	28,8	2,3

¹Contessi (2016); ²Sakamoto *et al.* (2016); ³Sbroglia *et al.* (2018a); ⁴Flach (2020)

Fonte: adaptado de Domingues *et al.* (2019).

2.1.9 Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos em Santa Catarina

Foi elaborado um banco de dados dos parâmetros geotécnicos de resistência ao cisalhamento dos solos para o Estado de Santa Catarina, com ênfase na zona costeira, obtidos a partir de ensaios de laboratório - Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial, e de campo - *Borehole Shear Test* (BST). O banco de dados conta com 608 resultados de ensaios realizados em amostras de solos residuais e sedimentares originados de 37 substratos litológicos distintos.

Os dados foram adquiridos a partir do levantamento de trabalhos acadêmicos, artigos científicos e projetos desenvolvidos na área de geotecnia, como o projeto de Elaboração de Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização frente aos Desastres Naturais (FLORES *et al.*, 2015-2019). No total, os dados distribuem-se por 46 municípios localizados, em maior parte, na zona costeira de Santa Catarina, conforme se pode observar na Figura 21. Dentre eles, os municípios com maior número de dados foram Florianópolis (148), Blumenau (51) e Santo Amaro da Imperatriz (32).

Tabela 6 - Valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nos municípios da zona costeira de Santa Catarina.

Residual de Anfibólio			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Litoral Centro</i>	15	9,23	30,00
Águas Mornas	2	12,00	31,05
Santo Amaro da Imperatriz	11	8,87	30,19
Tijucas	2	8,45	27,85
Substrato litológico	15	9,23	30,00
Residual de Arenito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Baixada Norte</i>	1	17,21	24,80
São Bento do Sul	1	17,21	24,80
<i>RH Vale do Itajaí</i>	16	14,94	30,95
Alfredo Wagner	1	14,80	26,20
Blumenau	3	10,97	30,10
Gaspar	1	11,46	28,37
Ilhota	3	11,57	25,53
Ituporanga	1	9,43	33,30
Presidente Getúlio	3	18,27	36,90
Taió	4	20,23	32,45
<i>RH Sul Catarinense</i>	1	20,40	29,80
Tubarão	1	20,40	29,80
Substrato litológico	18	15,37	30,55
Residual de Argilito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	10	17,05	25,33
Botuverá	4	15,13	33,35
José Boiteux	1	18,20	29,80
Ibirama	3	2,72	15,18
Rio dos Cedros	1	14,00	20,70
Taió	1	35,20	27,60
<i>RH Planalto de Canoinhas</i>	11	10,45	24,85
Rio Negrinho	11	10,45	24,85
Substrato litológico	21	15,95	25,25
Residual de Basalto			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Rio do Peixe</i>	4	2,38	23,19
Joaçaba	4	2,38	23,19
Residual de Conglomerado			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	3	11,81	26,23
Blumenau	2	15,10	24,75
Ilhota	1	5,24	29,20

Substrato litológico	3	11,81	26,23
Residual de Diabásio			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Litoral Centro</i>	15	33,59	25,38
Florianópolis	14	10,18	31,56
Palhoça	1	57,00	19,20
<i>RH Sul Catarinense</i>	1	9,10	33,50
Rio Fortuna	1	9,10	33,50
<i>RH Extremo Sul Catarinense</i>	3	24,73	36,75
Criciúma	1	40,40	39,10
Nova Veneza	2	9,05	34,40
Substrato litológico	19	14,06	31,71
Residual de Diamectito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	1	7,30	33,40
Alfredo Wagner	1	7,30	33,40
Residual de Diorito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Sul Catarinense</i>	1	22,60	28,40
Tubarão	1	22,60	28,40
Residual de Filito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	1	23,58	15,90
Gaspar	1	23,58	15,90
<i>RH Litoral Centro</i>	1	12,57	26,22
Santo Amaro da Imperatriz	1	12,57	26,22
Substrato litológico	2	18,07	21,06
Residual de Folhelho/Residual de Folhelho e Siltito/Residual de Siltito e Folhelho			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	11	9,08	28,14
Alfredo Wagner	2	5,60	34,00
Ilhota	3	7,51	26,53
Ituporanga	1	16,00	19,80
José Boiteux	1	8,40	28,20
Presidente Getúlio	3	10,37	31,53
Rio do Sul	1	10,67	19,29
<i>RH Litoral Centro</i>	1	12,57	26,22
Santo Amaro da Imperatriz	1	12,57	26,22
<i>RH Extremo Sul Catarinense</i>	5	19,38	32,11
Criciúma	2	24,65	35,55
Nova Veneza	3	14,10	28,67
Substrato litológico	17	12,00	28,99
Residual de Gabro			

Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	10	19,98	30,02
Blumenau	5	13,04	32,32
Rodeio	2	43,05	27,55
Timbó	3	16,17	27,83
Substrato litológico	10	19,98	30,02
Residual de Gnaiss			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Baixada Norte</i>	24	8,93	29,41
Jaraguá do Sul	3	16,86	31,20
Joinville	21	7,79	29,11
<i>RH Vale do Itajaí</i>	56	12,81	29,76
Blumenau	17	11,82	29,85
Camboriú	1	10,90	34,20
Ibirama	3	1,60	22,55
Ilhota	10	18,94	29,23
Luiz Alves	3	20,67	23,51
Navegantes	1	7,4	36,00
Rio dos Cedros	11	12,99	31,04
Rodeio	4	2,35	33,90
Timbó	6	14,90	30,23
<i>RH Litoral Centro</i>	9	12,40	30,46
Antônio Carlos	2	11,58	31,80
Palhoça	2	14,36	23,23
Santo Amaro da Imperatriz	5	11,26	36,34
Substrato litológico	89	11,76	29,94
Residual de Gnaiss e Migmatito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Litoral Centro</i>	10	10,81	26,99
São José	10	10,81	26,99
Residual de Granito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	16	9,45	30,83
Balneário Camboriú	3	4,13	34,40
Botuverá	1	12,50	31,30
Brusque	5	10,84	30,00
Camboriú	5	19,65	25,46
Gaspar	1	2,68	22,93
Itajaí	1	6,90	40,90
<i>RH Litoral Centro</i>	158	10,76	30,73
Águas Mornas	2	8,65	32,05
Antônio Carlos	16	8,90	32,91
Biguaçu	2	15,70	25,05
Florianópolis	93	10,15	30,66
Governador Celso Ramos	1	16,00	28,70

Itapema	2	31,70	28,20
Nova Trento	6	8,77	33,53
Palhoça	1	39,20	21,73
Santo Amaro da Imperatriz	11	7,74	32,44
São José	12	15,98	26,09
São Pedro de Alcântara	10	10,66	32,67
Tijucas	2	6,15	30,50
<i>RH Sul Catarinense</i>	23	7,37	32,21
Braço do Norte	9	9,53	30,02
Rio Fortuna	1	2,30	34,50
Tubarão	13	6,26	33,55
Substrato litológico	196	10,45	30,83
Residual de Granito e Migmatito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	8	16,54	31,15
Blumenau	6	17,01	31,27
Timbó	2	15,15	30,80
Substrato litológico	8	16,54	31,15
Residual de Granitóide			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	1	5,14	29,30
Blumenau	1	5,14	29,30
<i>RH Sul Catarinense</i>	6	9,35	31,82
Braço do Norte	6	9,35	31,82
Substrato litológico	7	8,75	31,46
Residual de Granulito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Baixada Norte</i>	2	16,40	32,50
Corupá	2	16,40	32,50
<i>RH Vale do Itajaí</i>	2	11,60	28,50
Gaspar	2	11,60	28,50
Substrato litológico	4	14,00	30,50
Residual de Meta-Arenito e Quartzito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	4	11,58	29,70
Brusque	4	11,58	29,70
Residual de Micaxisto			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	4	16,93	35,80
Brusque	4	16,93	35,80
Residual de Migmatito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	3	11,57	28,37

Balneário Camboriú	1	11,40	31,50
Blumenau	1	14,70	21,80
Camboriú	1	8,60	31,80
<i>RH Litoral Centro</i>	3	29,78	24,45
Itapema	1	23,20	21,70
São José	2	36,35	27,20
Substrato litológico	6	21,77	26,87
Residual de Milonito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	2	10,84	24,09
Gaspar	1	11,42	24,00
Ilhota	1	10,26	24,18
Substrato litológico	2	10,84	24,09
Residual de Pelito/ de Pelito e Siltito/Residual de Siltito e Pelito/Residual de Siltito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	4	19,92	30,25
Blumenau	1	11,80	32,00
Gaspar	1	10,64	34,71
Indaial	1	44,16	26,80
Navegantes	1	13,10	27,50
<i>RH Extremo Sul Catarinense</i>	2	17,05	30,50
Criciúma	2	17,05	30,50
Substrato litológico	6	18,97	30,34
Residual de Piroxenito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	6	18,19	24,92
Blumenau	3	27,06	24,60
Ilhota	3	9,32	25,23
Substrato litológico	6	18,19	24,92
Residual de Riolito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Baixada Norte</i>	2	8,00	33,20
São Bento do Sul	2	8,00	33,20
<i>RH Litoral Centro</i>	4	15,35	25,09
Florianópolis	2	5,60	27,84
Palhoça	1	49,50	17,90
Santo Amaro da Imperatriz	1	0,70	26,80
Substrato litológico	6	12,90	27,80
Residual de Sericita, Biotita, Filito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	3	21,20	30,23
Brusque	3	21,20	30,23

Residual de Sienito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Planalto de Lages</i>	3	13,20	25,53
Lages	3	13,20	25,53
Residual de Siltito e Arenito/Residual de Arenito e Siltito/Residual de Arenito e Pelito/Residual de Arenito e Folhelho/Residual de Arenito, Siltito e Pelito/Residual de Pelito, Arenito e Siltito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	17	9,50	27,71
Alfredo Wagner	2	9,85	24,55
Blumenau	6	15,40	25,97
Ituporanga	2	5,35	27,55
José Boiteux	1	6,10	28,80
Rio do Sul	2	1,80	30,67
Taió	4	18,50	28,73
<i>RH Sul Catarinense</i>	3	11,40	38,83
Braço do Norte	3	11,40	38,83
<i>RH Extremo Sul Catarinense</i>	4	8,22	28,38
Araranguá	2	6,35	27,25
Criciúma	1	7,30	29,40
Nova Veneza	1	11,00	28,50
Substrato litológico	24	11,32	28,91
Residual de Tonalito			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Litoral Centro</i>	1	8,20	28,70
São José	1	8,20	28,70
Residual de Ultramáfica			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	1	23,70	24,50
Blumenau	1	23,70	24,50
Residual de Xisto			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	24	11,64	30,72
Balneário Camboriú	2	2,42	20,79
Botuverá	3	13,83	37,20
Brusque	8	18,44	31,40
Camboriu	8	11,75	29,71
Itajaí	2	13,40	29,50
Navegantes	1	10,00	35,70
<i>RH Litoral Centro</i>	5	19,95	28,40
Itapema	1	24,50	29,00
Nova Trento	2	16,71	35,10
Santo Amaro da Imperatriz	1	15,60	29,10
Tijucas	1	23,00	20,40

Substrato litológico	29	14,52	30,53
Depósito de Encosta			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Vale do Itajaí</i>	21	9,64	32,66
Alfredo Wagner	2	16,25	27,75
Blumenau	3	10,87	29,93
Camboriú	1	5,00	33,60
Gaspar	1	9,31	33,46
Ituporanga	2	0,60	33,90
José Boiteux	1	14,00	40,60
Navegantes	1	5,20	32,80
Rio do Sul	3	16,00	40,10
Rodeio	1	9,20	33,00
Taió	2	11,80	25,25
Timbó	4	9,43	29,53
<i>RH Litoral Centro</i>	20	9,12	31,69
Florianópolis	16	7,93	31,89
Santo Amaro da Imperatriz	1	7,92	30,50
São José	3	15,87	31,03
<i>RH Vale do Rio do Peixe</i>	1	1,00	25,41
Joaçaba	1	1,00	25,41
<i>RH Sul Catarinense</i>	1	12,50	41,00
Rio Fortuna	1	12,50	41,00
Substrato litológico	43	9,63	31,99
Sedimentos Quaternários			
Localização	Nº. de ensaios	Coesão [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>RH Baixada Norte</i>	2	6,20	30,39
Joinville	2	6,20	30,39
<i>RH Vale do Itajaí</i>	11	5,94	30,86
Balneário Camboriú	1	10,86	34,17
Camboriú	2	3,40	35,28
Rio do Sul	1	3,60	28,37
Taió	7	5,89	25,61
<i>RH Litoral Centro</i>	23	5,41	30,16
Florianópolis	23	5,41	30,16
<i>RH Extremo Sul Catarinense</i>	1	1,30	36,80
Araranguá	1	1,30	36,80
Substrato litológico	37	5,42	29,78

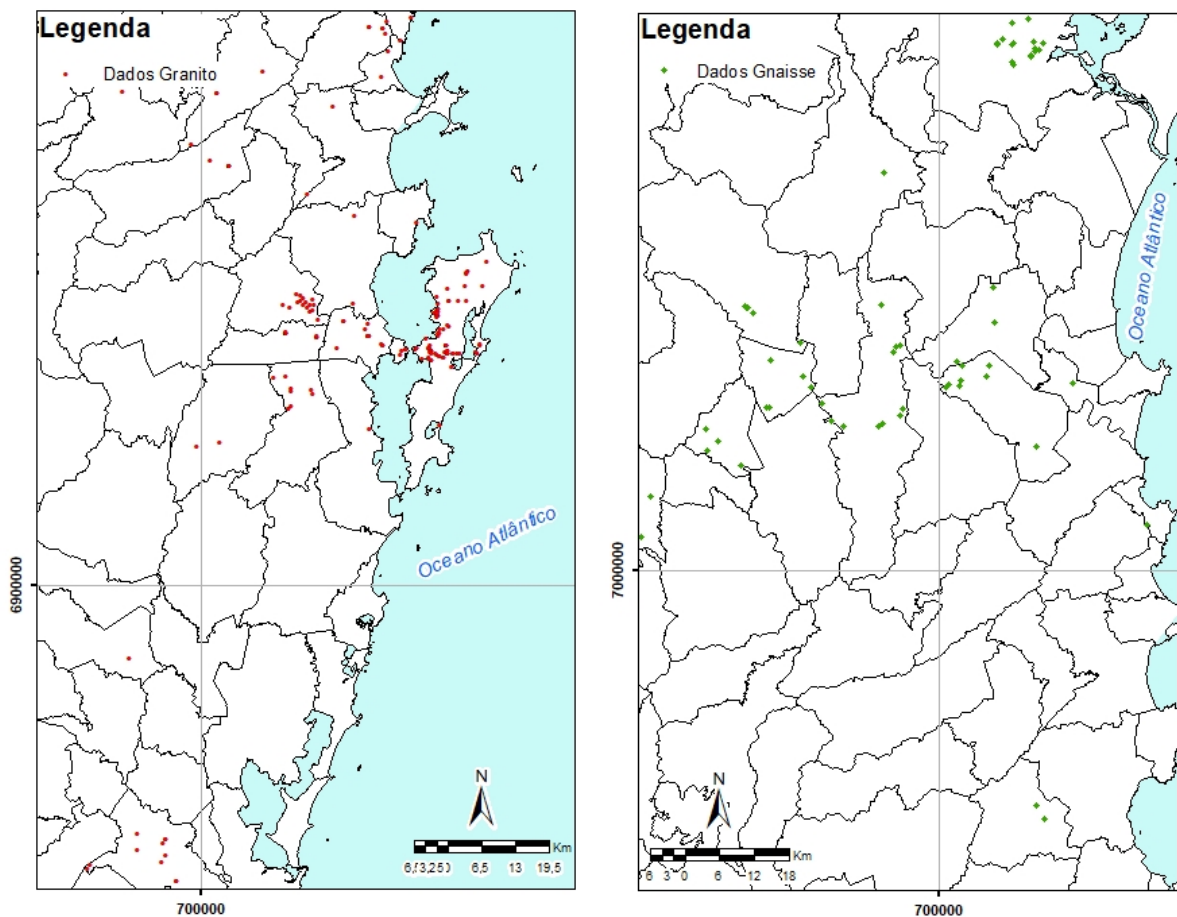
Fonte: elaborado pela Autora.

Ainda, a fim de uma melhor visualização da distribuição geográfica das informações do banco de dados para os solos mais representativos da zona costeira do Estado de Santa Catarina, e que possuem o maior número de dados, foram elaborados mapas com a localização

dos pontos de coleta de amostra de solo para execução do ensaio em laboratório ou o local de execução do ensaio BST.

A Figura 22 apresenta a distribuição dos dados para o solo residual de granito, a maior ocorrência desse tipo de solo no banco de dados ocorre na região hidrográfica Litoral Centro, especialmente nos municípios costeiros; e dos dados levantados para o solo residual de gnaiss, a maior ocorrência desse tipo de solo ocorre nas regiões hidrográficas Baixada Norte e Vale do Itajaí.

Figura 22 - Distribuição geográfica dos dados para o solo residual de granito e gnaiss.



Fonte: elaborado pela Autora.

2.2 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são considerados processos naturais, nos quais há o transporte de volumes de solo e rochas pela vertente abaixo sob influência da gravidade (CHRISTOFOLLETTI, 1979; SELBY, 1993). Existem na natureza vários tipos de movimentos

de massa os quais envolvem uma grande variedade de materiais, processos e fatores condicionantes.

Desse modo, devido a essa grande variedade, diversos autores realizaram a classificação dos movimentos de massa (Quadro 2). Internacionalmente, a mais utilizada é a classificação elaborada por Varnes (1978) e Hutchinson (1988). No Brasil, destacam-se as desenvolvidas por Freire (1965), Guidicini e Neible (1984), Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT (1991) e Augusto Filho (1994).

Quadro 2 - Classificação dos movimentos de massa segundo distintos autores.

Classificação dos movimentos de massa					
Varnes (1978)	Freire (1965)	Guidicini e Nieble (1984)	Hutchinson (1988)	IPT (1991)	Augusto Filho (1994)
<i>Escoamentos</i>	<i>Escoamentos:</i>	<i>Escoamentos:</i>	<i>Rastejo</i>	<i>Rastejos</i>	<i>Rastejos</i>
<i>Espalhamentos laterais</i>	Rastejos e Corridas	Rastejos e Corridas	<i>Escoamento ou fluxo</i>	<i>Corridas de Massa</i>	<i>Corridas/Fluxos</i>
<i>Escorregamentos: Rotacionais</i>	<i>Escorregamentos: Rotacionais e</i>	<i>Escorregamentos: Rotacionais e</i>	<i>Escorregamentos</i>	<i>Escorregamentos</i>	<i>Escorregamentos</i>
Translacionais	Translacionais	Translacionais			
		Queda de Blocos			
<i>Quedas e Tombamentos</i>	<i>Subsidências e Desabamentos</i>	<i>Subsidências: Subsidência, Recalque e Desabamento</i>	<i>Quedas e Tombamentos</i>	<i>Quedas/ Tombamentos</i>	<i>Quedas de Blocos</i>
Complexos		Formas de Transição	Complexos		
		Movimentos Complexos			

Fonte: elaborado pela Autora.

De modo geral, segundo os autores, os movimentos de massa são classificados em: rastejos, quedas de bloco, fluxos, deslizamentos e os movimentos complexos. Essa classificação é realizada basicamente em função da velocidade do fenômeno, tipo de material, geometria e teor de água (Figura 23).

Os rastejos são movimentos muito lentos e contínuos de camadas superficiais sobre camadas mais profundas de solo, que ocorrem nas vertentes. São causados por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar rupturas. Geralmente, envolvem grande quantidade de material, cuja movimentação normalmente é provocada pela ação da gravidade (CAPUTO, 1975; GUIMARÃES *et al.*, 2008; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

As quedas são movimentos rápidos de blocos de rochas de volume e geometria variáveis pela ação da gravidade (GUIDICINI; NEIBLE, 1984). Típicas de área com relevo muito íngreme e paredões rochosos, sua ocorrência é favorecida pela presença de descontinuidades na rocha, tais como fraturas e bandamentos composicionais, assim como pelo avanço do intemperismo físico e químico (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008; FERNANDES; AMARAL, 2000).

Os fluxos são movimentos rápidos nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos devido à elevada umidade (GUIDICINI; NEIBLE, 1984; IPT, 1991). São iniciados pelos processos de ruptura de encostas com deslizamentos onde a massa deslizada segue a calha fluvial mobilizando um expressivo volume de material em um curto período de tempo, com grande velocidade e capacidade de transporte, o qual alcança grandes distâncias, podendo atingir inclusive áreas planas. Com alto poder de destruição, a ocorrência dos fluxos de detritos em novembro de 2008, foi relacionada às elevadas precipitações e à presença de encostas declivosas, longas e vales encaixados.

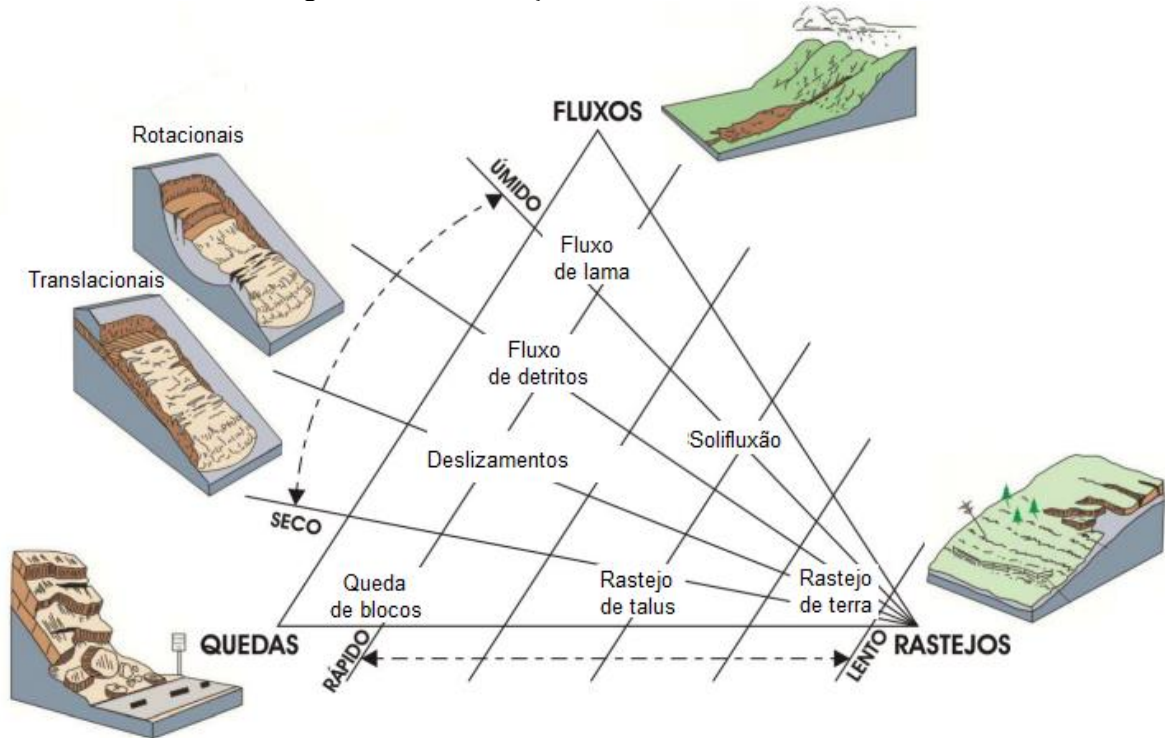
Os deslizamentos caracterizam-se como rápidos, de curta duração, com plano de ruptura bem definido, podendo ainda ser facilmente identificados os volumes instabilizados (FERNANDES; AMARAL, 2000; CARVALHO; MACEDO; OGURA, 2007). São feições geralmente longas, podendo apresentar uma relação comprimento-largura de cerca de 10:1 (SUMMERFIELD, 1991 *apud* FERNANDES; AMARAL, 2000). O principal agente deflagrador desse processo são as chuvas.

Os movimentos de massa complexos são classificados por Varnes (1978), Guidicini e Nieble (1984), Hutchinson (1988) e Broms e Wong (1990) e estão associados à combinação de formas de movimentos, caracterizando-se por movimentos múltiplos, ou complexos, e pela ação de vários agentes simultâneos ou sucessivos. Esses movimentos de massa sofrem modificações nas características morfológicas, mecânicas ou causais durante sua deflagração.

Dessa forma, há dificuldade em sua identificação por geoprocessamento ou em campo derivada das atividades antrópicas e das rápidas transformações que ocorrem nas cicatrizes dos movimentos de massa, mas também associadas à própria complexidade dos fenômenos. Por exemplo, a deflagração do movimento ocorre como um deslizamento translacional ou rotacional e se transforma gradativamente em fluxo devido ao excesso de água ou, ainda, um

deslizamento rotacional pode desestabilizar o pé da encosta desencadeando outros tipos de movimentos de massa (BROMS; WONG, 1990; FERNANDES *et al.*, 2001).

Figura 23 - Classificação dos movimentos de massa.



Fonte: adaptado de Carson e Kirkby (1975) e USGS (2004).

2.2.1 Deslizamentos

Um deslizamento de talude ocorre quando as forças de cisalhamento atuantes superam as forças resistentes. Isso se deve, principalmente, à infiltração de água no maciço de solo, que reduz as tensões efetivas entre partículas pelo aumento da poropressão. Quando o solo atinge o estado de saturação com perda de tensões entre as partículas, a porção do terreno suscetível se mobiliza encosta abaixo com uma velocidade variável, de acordo com a declividade e as características físicas (TOMINAGA, 2009).

2.2.1.1 Superfície de ruptura

Os deslizamentos são geralmente divididos com base no tipo de material movimentado e na forma do plano de ruptura. Quanto ao material movimentado, pode ser constituído por

rocha, solos residuais ou sedimentos. Quanto à forma do plano de ruptura, os deslizamentos subdividem-se, basicamente, em rotacionais e translacionais. No Quadro 3 são apresentadas as principais características desses tipos de superfície de ruptura.

Os deslizamentos rotacionais (*slumps*) possuem uma superfície de ruptura curva côncava, ao longo da qual se dá um movimento rotacional da massa de solo. Dentre as condições que mais favorecem à geração desses movimentos destaca-se a existência de solos espessos e homogêneos, sendo comum em encostas compostas por material de alteração homogêneo originado de rochas argilosas como argilitos e folhelhos (FERNANDES; AMARAL, 2000). Na região onde se localiza a área de estudo, os deslizamentos rotacionais foram movimentos de massa numerosos, embora de menor porte quando comparados aos translacionais. Segundo Tomazzoli, Flores e Bauzys (2009), eles ocorreram principalmente nas áreas mais urbanizadas e, quase sempre, relacionados a ações antrópicas como cortes de talude inadequados ou sobrecarga da encosta devido ao peso de construções.

Os deslizamentos translacionais (*translational landslide*) são os mais frequentes entre todos os tipos de movimentos de massa, principalmente nas encostas serranas brasileiras, ocorrendo predominantemente em solos pouco desenvolvidos das vertentes com altas declividades. Sua geometria caracteriza-se por uma pequena espessura com comprimentos bem superiores às larguras, na qual o plano de ruptura encontra-se, na grande maioria das vezes, em profundidades que variam entre 0,5m e 5,0m (FERNANDES; AMARAL, 2000; CARVALHO; MACEDO; OGURA, 2007; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Os deslizamentos translacionais, de acordo com Santos (2004), têm probabilidade crescente de ocorrer a partir de episódios de chuvas de 100mm/dia antecedidas por chuvas de saturação nos 3 a 4 dias precedentes. Segundo Fernandes e Amaral (2000) e Guidicini e Nieble (1984), geralmente se originam em planos de fraqueza ou ao longo da interface solo-rocha, a qual representa uma importante descontinuidade mecânica e hidrológica. A dinâmica hidrológica nesses movimentos possui caráter mais superficial e as rupturas tendem a ocorrer rapidamente, devido ao aumento da poropressão positiva durante eventos pluviométricos de alta intensidade ou duração que reduz a resistência ao cisalhamento (SELBY, 1993).

Os deslizamentos costumam ocorrer em áreas montanhosas logo abaixo de rupturas de declive positivas, quando se passa de uma inclinação menor para uma inclinação maior, em encostas retilíneas com inclinação superior a 30° (SANTOS, 2004). Tomazzoli, Flores e Bauzys

(2009) afirmam que os deslizamentos translacionais foram os movimentos de maior porte e mais importantes na região onde se localiza a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú porque deslocaram os maiores volumes de solo, rochas e detritos.

Quadro 3 - Características dos deslizamentos rotacionais e translacionais.

DESLIZAMENTO ROTACIONAL	DESLIZAMENTO TRANSLACIONAL
Descrição Geral	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A superfície da ruptura é curva apresentando forma côncava (em forma de colher) e o movimento ocorre, principalmente, de maneira rotatória em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude; ▪ Associa-se a taludes (naturais e artificiais) com inclinação entre 20 e 40 graus. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A superfície de ruptura ocorre sobre uma superfície predominantemente plana; ▪ Ao contrário dos deslizamentos rotacionais, esses podem progredir por extensa distância, pois apresentam maior dificuldade para restaurar o equilíbrio; ▪ Ocorrem ao longo de descontinuidades hidrogeológicas tais como falhas, estratificações, solos de diferente permeabilidade ou contato entre solo e rocha; ▪ São mais rasos e apresentam maior velocidade que o deslizamento rotacional.
Ocorrência	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ocorre, frequentemente, em materiais homogêneos, sendo o tipo mais comum para áreas de aterro. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ É o movimento gravitacional de massa de maior ocorrência, sendo que pode ser desencadeado em todos os tipos de ambientes e condições.
Mecanismos de desencadeamento	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chuvas intensas e/ou contínuas podem saturar o solo; ▪ Aumento do nível do rio; ▪ Elevação dos níveis do aquífero freático; ▪ Aumento do nível de água devido irrigações, vazamentos de tubulações, erosão regressiva; ▪ Eventos sísmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chuvas intensas e/ou contínuas podem saturar o solo; ▪ Aumento do nível do rio; ▪ Elevação dos níveis do aquífero freático; ▪ Aumento do nível de água devido irrigações, vazamentos de tubulações, erosão regressiva; ▪ Eventos sísmicos.
Efeitos	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Podem ser danosos para estruturas, rodovias e redes de abastecimento; ▪ Geralmente não oferecem risco a vidas, principalmente, se o movimento for lento ou detectado antecipadamente; ▪ Podem alterar a margem de rios, represar rios e provocar inundações; ▪ Podem desestabilizar estruturas localizadas sobre a área em que está ocorrendo a movimentação. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Podem ser danosos para estruturas, rodovias e redes de abastecimento; ▪ Representam perigo à vida, principalmente, quando há elevada velocidade e alcance; ▪ Alta probabilidade de ocorrência em áreas anteriormente afetadas.

Fonte: adaptado de Highland e Bobrowsky (2008).

2.2.1.2 Condicionantes

Fatores condicionantes como geológicos, geomorfológicos e geotécnicos, aspectos climáticos e hidrológicos, vegetação e a ação do ser humano relativa às formas de uso e ocupação do solo determinam a localização espacial e temporal dos deslizamentos. Uma das

formas de se classificar esses fatores, dinâmicos ou estáticos, é de acordo com o papel que eles exercem na desestabilização das encostas, dividindo-os em: fatores condicionantes, fatores preparatórios e fatores desencadeadores (GLADE; CROZIER, 2005).

Os fatores condicionantes, ou de predisposição, são estáticos e inerentes às características dos terrenos. Eles estabelecem as condições responsáveis pela instabilidade com base na complexa relação entre as condições dos terrenos e um conjunto de processos (geológicos, geomorfológicos, físicos e antrópicos) que atuam nas encostas a curto ou a longo prazo (GLADE; CROZIER, 2005). No Quadro 4 são exemplificados os fatores condicionantes e sua importância para a determinação da suscetibilidade a deslizamentos para os diferentes métodos de análise da estabilidade de encostas.

Quadro 4 - Fatores condicionantes e sua importância relativamente aos métodos de análise suscetibilidade a movimentos de massa.

Fatores de Predisposição	Métodos de Análise de Estabilidade das Encostas				
	Heurísticos	Estatísticos	Determinísticos	Probabilísticos	
Derivados do MDE	Altitude	Elevada	Crítico	Crítico	Crítico
	Declividade, Orientação e Forma das encostas	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
	Morfologia	Elevada	Baixa	Não Relevante	Não Relevante
	Acumulação de fluxos	Baixa	Moderada	Elevada	Elevada
Geologia	Litologia	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
	Aspectos estruturais	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
	Falhas	Elevada	Elevada	Não Relevante	Não
Solo	Tipo de solo	Elevada	Elevada	Crítico	Elevada
	Espessura do solo	Não Relevante	Não Relevante	Crítico	Elevada
	Propriedade geotécnica	Elevada	Elevada	Crítico	Elevada
Hidrologia	Hidrologia (propriedades, nível da água, rede de drenagem)	Não Relevante	Não Relevante	Crítico	Elevada
Geomorfologia	Unidades geomorfológicas principais	Crítico	Moderada	Baixa	Baixa
	Unidades geomorfológicas detalhadas	Elevada	Elevada	Moderada	Baixa
Uso do Solo	Uso do solo	Elevada	Elevada	Elevada	Elevada
	Alterações ao uso do solo	Elevada	Elevada	Elevada	Crítico

Fonte: adaptado de Westen *et al.* (2008).

Destaca-se que a seleção dos fatores condicionantes para a elaboração dos mapas de suscetibilidade vai depender do tipo de movimento que está sendo investigado, das características do terreno, da disponibilidade de dados e informações existentes, dos custos envolvidos na análise e da escala que está sendo utilizada (WESTEN *et al.*, 2008).

Os fatores preparatórios são dinâmicos e acarretam a redução da estabilidade de uma encosta sem, no entanto, dar início ao movimento. Eles são responsáveis pela alteração do estado de equilíbrio de uma vertente como, a longo prazo, a alteração das rochas, e a curto prazo, a remoção da vegetação, processos erosivos, execução de aterro, escavação de taludes, entre outros (GLADE; CROZIER, 2005).

Por fim, os fatores desencadeadores são aqueles que dão início ao movimento do solo, tornando a encosta instável. Eles são dinâmicos, podendo-se citar a precipitação intensa e/ou prolongada, fusão rápida do gelo, atividade sísmica, erupção vulcânica, entre outros (GLADE; CROZIER, 2005).

2.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DAS ENCOSTAS A DESLIZAMENTOS

Os métodos mais utilizados para análise da estabilidade de taludes fundamentam-se na hipótese de que a massa de solo se encontra em equilíbrio e comporta-se como um corpo rígido-plástico na iminência de ruptura, dessa forma, analisam-se as equações para a situação limite, denominados métodos de equilíbrio limite (DAS, 2011).

A análise com base nos métodos de equilíbrio limite considera que os esforços que tendem a induzir a ruptura em uma vertente são exatamente balanceados pelos esforços resistentes. A fim de comparar a estabilidade das vertentes em condições diferentes de equilíbrio é definido o Fator de Segurança (FS), índice obtido pela razão entre a soma dos esforços resistentes ao deslizamento e dos esforços cisalhantes (Equação 8).

$$FS = \frac{\Sigma \text{ das esforços resistentes}}{\Sigma \text{ das esforços cisalhantes}} \quad (8)$$

A redução dos esforços resistentes pode ocorrer por alterações nas características inerentes ao material constituinte da encosta, por ação do intemperismo, por efeito de oscilações térmicas, por efeito de vibrações, por variação das poropressões, por elevação do aquífero

freático, por infiltração de água em meios não saturados, por efeito de excesso de poropressão ou por fluxo preferencial (VARNES, 1978; GUIDICINI; NIEBLE, 1984; SELBY, 1993).

O aumento dos esforços cisalhantes pode ocorrer por agentes externos que provocam a elevação da tensão cisalhante sem a redução da resistência, devido a alteração na inclinação da encosta, por remoção de massa lateral ou basal, por estresses transitórios (vibração de atividades humanas e terremotos), por fenômenos de erosão ou cortes, por sobrecarga (peso da água pluvial, acúmulo natural de material ou construções de estruturas e aterros) (VARNES, 1978; SELBY, 1993).

A Equação 8 também pode ser expressa da seguinte forma (Equação 9), sendo σ a tensão normal na superfície de ruptura e τ a tensão cisalhante necessária para o equilíbrio.

$$FS = \frac{c + \sigma \cdot \text{tg}\varphi}{\tau} \quad (9)$$

Dessa forma, para valores de FS inferiores a 1, o talude é considerado instável e é suscetível à ruptura; FS equivalente a 1 significa que os esforços resistentes são iguais aos esforços cisalhantes e, assim, o talude encontra-se na iminência de ruptura; e, valores superiores a 1, o talude é considerado estável. Ademais, quanto maior for o FS resultante, mais estável será o talude.

Segundo a Norma Técnica da ABNT 11.682/2009, o FS mínimo a ser adotado depende dos riscos envolvidos em cada situação analisada e, portanto, inicialmente deve-se enquadrar cada caso em uma das seguintes classificações de nível de segurança, as quais são definidas a partir da possibilidade de perda de vidas humanas e de danos materiais e ambientais (Quadro 5).

Quadro 5 - Nível de segurança desejado contra perdas de vidas humanas, danos materiais e ambientais.

Nível de Segurança	Critérios
Alto	<p><i>Perdas de vidas humanas:</i> Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego intenso.</p> <p><i>Danos materiais:</i> Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais.</p>

	<i>Danos ambientais:</i> Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos perigosos/tóxicos.
Médio	<i>Perdas de vidas humanas:</i> Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego moderado. <i>Danos materiais:</i> Locais próximos a propriedades de valor moderado. <i>Danos ambientais:</i> Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	<i>Perdas de vidas humanas:</i> Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido. <i>Danos materiais:</i> Locais próximos a propriedades de valor reduzido. <i>Danos ambientais:</i> Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: NBR 11.682 (ABNT, 2009).

Dessa forma, levando-se em consideração os níveis de segurança contra danos a vidas humanas *versus* danos materiais e ambientais, o FS mínimo a ser adotado deve ser de acordo com o disposto no Quadro 6.

Quadro 6 - Fatores de Segurança mínimos conforme ABNT NBR 11.682/2009.

		<i>Nível de segurança contra danos a vidas humanas</i>		
		Alto	Médio	Baixo
<i>Nível de segurança contra danos materiais e ambientais</i>	Alto	1,5	1,5	1,4
	Médio	1,5	1,4	1,3
	Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR 11.682 (ABNT, 2009).

Em análise de estabilidade de taludes, cita-se a elaboração de mapas de suscetibilidade a ocorrência de determinado fenômeno ou sua probabilidade de ocorrência (FERNANDES *et al.*, 2001), sem considerar o risco de danos materiais e a vidas humanas.

A representação gráfica dos mapas de suscetibilidade possui elevada importância, uma vez que possibilita eficiência na divulgação e interpretação dos resultados e na sua aplicação, principalmente, relacionada ao ordenamento territorial (GARCIA; ZÊZERE; OLIVEIRA, 2007). De acordo com Barella (2016), não há padronização, a nível internacional, do número de classes que deve possuir um mapa de suscetibilidade, sendo possível encontrar variações, desde uma simples divisão entre áreas estáveis e instáveis, até outros mais amplos, que podem envolver até 7 classes, como é o caso do modelo SHALSTAB.

Garcia, Zêzere e Oliveira (2007) afirmam que o objetivo principal da reclassificação é reduzir ao máximo a dimensão da classe de maior suscetibilidade, entretanto, garantir o mínimo

de deslizamentos nas áreas classificadas como menos suscetíveis. Os autores afirmam que devem ser escolhidos os métodos que levam em consideração o inventário de deslizamentos, pois são aquelas que melhor representam a realidade, uma vez que se baseiam em dados reais e não em simples análises estatísticas de frequência e amplitude.

2.3.1 Métodos de mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos

As rupturas não ocorrem de forma aleatória, mas são o resultado da ação conjunta de processos físicos e a sua atividade é controlada por leis mecânicas, dessa forma, os principais métodos de mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa são qualitativos (heurísticos) ou quantitativos (estatísticos e determinísticos). Estes visam a diminuição da subjetividade em relação àqueles, objetivando reduzir a intervenção do pesquisador no mapeamento.

O método heurístico ou empírico subdivide-se em direto (análise a partir de observações de campo e mapeamentos geológicos, geomorfológicos e/ou geotécnicos) ou indiretos (combinação qualitativa de mapas por meio da atribuição de pesos para cada fator condicionante). Nesse sentido, está estritamente relacionado ao conhecimento que o pesquisador possui *a priori*, e a definição das áreas instáveis é de caráter subjetivo (GUZZETTI, 2005; WESTEN *et al.*, 2008).

Os modelos estatísticos permitem determinar quantitativamente o peso específico de cada variável na instabilidade, ao mesmo tempo que possibilitam a validação dos resultados. Dessa forma, de acordo com Fernandes *et al.* (2001), é importante a disponibilidade de extensos bancos de dados representativos dos processos, pois os fatores que levaram à ruptura do solo no passado são determinados estatisticamente e são aplicadas previsões quantitativas para a determinação da suscetibilidade em áreas atualmente estáveis.

Os métodos determinísticos ou de bases físicas estão relacionados a modelos matemáticos embasados em leis físicas e mecânicas das encostas. São utilizados parâmetros geotécnicos, topográficos e hidrológicos em uma relação de causa e efeito, dessa forma, podem fornecer informação importante acerca das causas (fatores de predisposição) e dos fatores desencadeadores da instabilidade (GUZZETTI, 2005).

2.3.2 Utilização de modelos matemáticos

Com o avanço tecnológico na área de geoprocessamento, o mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos vem sendo cada vez mais popularizado e considerado fundamental na previsão de desastres. No entanto, ao mesmo tempo em que os modelos computacionais auxiliam na avaliação de deslizamentos, por possibilitar a elaboração de estudos de previsão e por gerar respostas imediatas perante a necessidade de tomadas de decisões, possuem limitações associadas à impossibilidade em reproduzir fielmente o comportamento da natureza, tendo que adotar simplificações (GOMES, 2006). Nesse contexto, vem se destacando o emprego de modelos matemáticos.

Os modelos matemáticos objetivam reproduzir os sistemas ambientais a partir de equações físicas que buscam descrever o comportamento dos processos que influenciam um fenômeno, desconsiderando uma possível opinião subjetiva e direta do pesquisador. Esses modelos podem ser divididos em estocásticos ou probabilísticos e determinísticos. Os modelos estocásticos ou probabilísticos geralmente adotam análises com bases estatísticas, que, de acordo com Tominaga (2009), conferem menor subjetividade aos mapeamentos de áreas suscetíveis, possibilitando a replicabilidade. Os modelos determinísticos, por sua vez, fundamentam-se em noções matemáticas de relações exatas, de causa e efeito, e consistem num conjunto de afirmações matemáticas, a partir das quais consequências únicas podem ser deduzidas (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Segundo Ramos *et al.* (2002), a modelagem matemática é capaz de prever a distribuição espacial e temporal dos deslizamentos dentro de uma determinada área, o que faz com que medidas preventivas possam ser implementadas antes da ocorrência do fenômeno, possibilitando a mitigação de seus danos. Nesse contexto, para a previsão de deslizamentos translacionais, destacam-se os modelos SHALSTAB e SINMAP, desenvolvidos por Montgomery e Dietrich (1994) e Pack, Tarboton e Goodwin (1998), respectivamente, e que integram a análise de estabilidade com base na teoria do talude infinito a modelos hidrológicos.

Esses dois modelos matemáticos apresentam base física semelhante, utilizando em suas análises parâmetros topográficos e hidrológicos (declividade, área de contribuição e comprimento de contorno) e parâmetros do solo (ângulo de atrito, intercepto de coesão, peso específico e espessura do solo). Entretanto, a diferença entre eles está relacionada na forma de

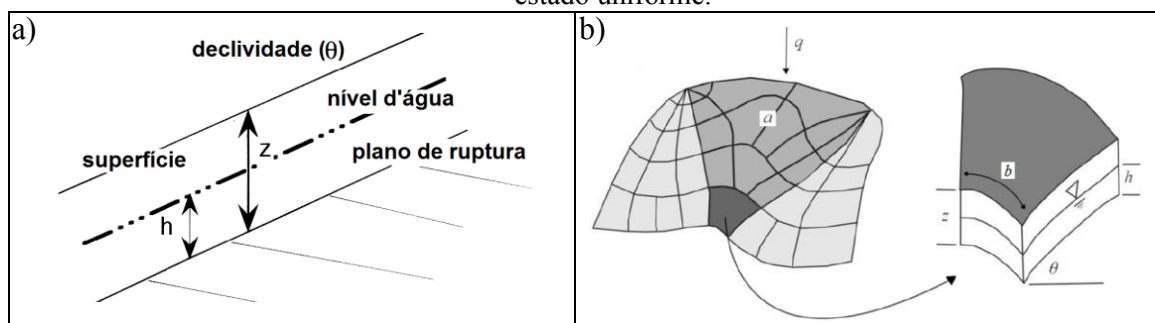
quantificar a instabilidade. Enquanto o SINMAP define o índice de estabilidade (*Stability Index* - SI) como a probabilidade de uma região ser estável, assumindo distribuições uniformes de parâmetros sobre intervalos de incerteza (PACK; TARBOTON; GOODWIN, 1998), o SHALSTAB quantifica a instabilidade do terreno em termos de chuva crítica efetiva necessária para desencadear a ruptura, em uma relação de causa e efeito.

2.3.2.1 Modelo SHALSTAB

Desenvolvido nos EUA pelos professores Ph.D. William E. Dietrich e Ph.D. David R. Montgomery, o SHALSTAB (*Shallow Slope Stability Model*) é um modelo matemático determinístico utilizado na identificação de áreas suscetíveis a ocorrência de deslizamentos translacionais rasos. Posteriormente, foi automatizado para utilização em SIG por Dietrich e Montgomery (1998), tornando possível a espacialização dos dados.

A fundamentação matemática do SHALSTAB é composta por dois módulos: um de estabilidade de encosta infinita (Figura 24a, Equação 10), que combina parâmetros geotécnicos e topográficos para simular o grau de estabilidade de uma determinada porção do solo localizada sobre o afloramento rochoso; e o outro hidrológico de estado uniforme (Figura 24b, Equação 11), que utiliza parâmetros geomorfológicos e hidrológicos para estimar o grau de saturação do terreno.

Figura 24 - Representação: a) modelo de estabilidade de encosta infinita e b) modelo hidrológico de estado uniforme.



Fonte: a) Caramez (2017), adaptado de Dietrich e Montgomery (1998).

Fonte: b) Sbroglia (2015), adaptado de Montgomery e Dietrich (1994).

$$\frac{h}{z} = \frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi}\right) \quad (10)$$

Onde h é a altura da coluna de água [m] e z a espessura do solo [m], c' é a coesão efetiva [kPa]; φ é o ângulo de atrito entre os grãos [graus]; ρ_s a densidade do solo [kg/m^3]; ρ_w é a densidade da água [kg/m^3]; g a aceleração da gravidade [m/s^2]; z a espessura do solo [m] e θ a declividade [graus].

$$W = \frac{h}{z} = \frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen}\theta} \quad (11)$$

Onde W é a umidade do solo [m/m], q é a taxa de recarga uniforme [m/d], T é transmissividade do solo [m^2/d], a é a área de contribuição a montante [m^2], b é o comprimento de contorno unitário [m], e θ é a declividade [graus].

O parâmetro W representa o índice de saturação do solo, que pode ser simplificado pela relação h/z , sendo h a espessura do solo saturado e z a espessura do solo (Equação 11). Dessa forma, realiza-se a combinação entre os dois modelos ($W = h/z$), hidrológico de estado uniforme e de estabilidade de encosta infinita, respectivamente, resultando na Equação 12.

$$\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen}\theta} = \frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) \quad (12)$$

A Equação 12 pode ser resolvida, pela rotina automatizada do SHALSTAB, em função de dois parâmetros hidrológicos, taxa de recarga (q) por transmissividade do solo (T), conforme Equação 13.

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \text{sen}\theta \cdot \left[\frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) \right] \quad (13)$$

Dietrich e Montgomery (1998) recomendam que, para o cálculo de q/T , é necessário utilizar os valores em escala logarítmica, sendo representado pela Equação 14. Isso se deve ao valor de transmissividade apresentar-se muito acima do valor da precipitação efetiva (precipitação menos evapotranspiração).

$$\text{Log} \frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \text{sen}\theta \cdot \left[\frac{c'}{\rho_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\varphi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) \right] \quad (14)$$

Ainda, é possível realizar uma simplificação do modelo por meio da adoção de valor nulo para a coesão, representado pela Equação 15 (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

$$\text{Log} \frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \text{sen}\theta \cdot \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) \right] \quad (15)$$

Segundo Dietrich e Montgomery (1998), o modelo calcula o grau de suscetibilidade a deslizamentos translacionais para cada célula (*pixel*) de uma malha (*grid*). Desse modo, a partir das Equações 14 e 15 foram determinadas sete classes de estabilidade em função do parâmetro $\text{Log}(q/T)$.

Devido ao resultado ser a razão entre a precipitação (q) e a transmissividade (T), a definição das classes foi realizada obedecendo-se as condições apresentadas no Quadro 7, sendo agrupados em uma mesma classe todos os *pixels* com valores considerados incondicionalmente estáveis e em outra classe os considerados incondicionalmente instáveis. Os valores intermediários foram divididos em classes de transição entre essas duas classes extremas, isto é, valores mais próximos daqueles considerados incondicionalmente instáveis necessitam de pouca quantidade de precipitação para ocorrer deslizamento, pois a elevada declividade se sobressai aos parâmetros de resistência do solo, enquanto áreas com valores próximos daqueles considerados incondicionalmente estáveis necessitam de elevado volume pluviométrico (GUIMARÃES *et al.*, 2003). Áreas classificadas como incondicionalmente estáveis apresentam baixa declividade, ou seja, não possuem condições para ocorrência de deslizamentos, embora estejam sob intensas cargas hidráulicas (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

Quadro 7 - Definição das classes extremas do modelo matemático SHALSTAB.

	Sem coesão	Com coesão
<i>Incondicionalmente estável</i>	$\tan\theta \leq \tan\varphi \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)$	$\tan\theta \leq \frac{c'}{\rho_s \cdot z \cdot g \cdot \cos^2\theta} + \tan\varphi \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}\right)$
<i>Incondicionalmente instável</i>	$\tan\theta > \tan\varphi$	$\tan\theta \geq \frac{c'}{\rho_s \cdot z \cdot g \cdot \cos^2\theta} + \tan\varphi$

Fonte: Montgomery e Dietrich (1994).

Fonte: Dietrich *et al.* (1995).

A partir da automatização do modelo, muitos estudos foram realizados em regiões de clima temperado, na costa oeste dos Estados Unidos (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY; SULLIVAN; GREENBERG, 1998; DIETRICH; BELLUGI; ASUA, 2001; GORSEVSKI *et al.*, 2006; BELLUGI *et al.*, 2011) e na Itália (FONTANA; BORGA; TAROLLI, 2005; SORBINO *et al.*, 2006; CARRARA; CROSTA; FRATTINI, 2008; AVANZI *et al.*, 2009; CERVI *et al.*, 2010).

2.3.3 Distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nas modelagens de suscetibilidade a deslizamentos

A heterogeneidade dos solos é um fator que deve ser levado em consideração em estudos de análise de estabilidade das encostas. Conforme a escala de mapeamento a ser adotada, os resultados podem possuir limitações em decorrência da insuficiência de dados de entrada requeridos pelos modelos matemáticos ou da problemática na sua regionalização (FERNANDES *et al.*, 2001), uma vez que a coesão e o ângulo de atrito variam entre diferentes solos, e até dentro de um mesmo material (DAS, 2011).

Nesse sentido, há autores que optam por reduzir o plano de amostragem a partir da coleta de solo nas áreas propensas à instabilidade, originando modelagens mais conservadoras em função da parametrização em condições desfavoráveis (SILVA, 2006). Outros autores, como Montgomery e Dietrich (1994), Ramos *et al.* (2002) e Gomes *et al.* (2005) utilizaram valor nulo de coesão, simplificando a equação matemática do modelo SHALSTAB, tornando ainda mais conservador o cenário. De acordo com Barella (2016), a anulação ou homogeneização dos parâmetros geotécnicos acabam por superestimar a importância dos parâmetros topográficos e hidrológicos na modelagem.

Guimarães *et al.* (2003) elaboraram um método para determinação dos parâmetros do solo de forma indireta para áreas onde esses dados são desconhecidos. Para isso, os autores modelaram 125 cenários de suscetibilidade a deslizamentos em duas bacias localizadas no Maciço da Tijuca, no município do Rio de Janeiro, a partir de distintas combinações dos valores de coesão, ângulo de atrito, espessura e densidade do solo e validaram por meio do inventário de cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em 1996. O intervalo para cada parâmetro específico foi definido a partir de dados obtidos na literatura levando-se em conta a sua variabilidade, estabelecendo-se cinco variações para cada parâmetro, sendo: c/z 0, 2, 4, 6 e 8kPa/m, ângulo de atrito 25, 30, 35, 40 e 45 graus; ρ_s 1,5, 1,75, 2, 2,25 e 2,5g/cm³. Dessa forma, foi produzido um *ranking* por ordem de desempenho de cada cenário, sendo o cenário que melhor previu os deslizamentos aquele que utilizou os valores: $c/z = 2\text{kPa}$, $\varphi = 45^\circ$ e $\rho_s = 1,5\text{g/cm}^3$.

Usualmente, são atribuídos valores numéricos dos parâmetros geotécnicos para áreas consideradas homogêneas, ou seja, que possuem um conjunto de características que as diferem das adjacentes. Considera-se, assim, somente um valor como representativo para toda aquela

área. Contudo, mesmo parâmetros obtidos por meios precisos devem ser espacializados para a área homogênea assumindo alto grau de subjetividade, uma vez que os resultados correspondem ao valor pontual de uma amostra (WESTEN *et al.*, 2008).

Seefelder *et al.* (2016) afirmam que, atualmente, não há consenso sobre o meio para se regionalizar adequadamente os parâmetros de entrada dos modelos de estabilidade de taludes. Dessa forma, considerando a incerteza inerente aos dados de entrada nos modelos e a impossibilidade de capturar a distribuição espacial dos parâmetros por meio de ensaios geotécnicos com detalhes suficientes, ou autores concluem que os cenários de suscetibilidade a deslizamentos produzidos por modelos com bases físicas em escala de bacia devem ser interpretados de forma relativa.

2.3.3.1 *Espacialização dos dados utilizando mapeamento geotécnico*

No mapeamento geotécnico, os solos são divididos em residuais e sedimentares. Os solos residuais são formados e permanecem sobre sua rocha de origem. Nesse sentido, sua composição depende do tipo e da mineralogia dessa rocha. Não existe um contato ou limite direto entre o solo e a rocha que o originou, ocorrendo uma transição gradual, o que normalmente reflete no aumento da resistência e na redução da compressibilidade com o aumento da profundidade. Os solos sedimentares são transportados do local de sua formação por um agente transportador, dessa forma, apresentam características geomecânicas em função do agente transportador, formando geralmente depósitos mais inconsolidados e fofos que os residuais e com profundidade variável (VARGAS, 1977).

Segundo Higashi (2006), a pedologia, associada às características da rocha de origem e relevo, é relevante na determinação do comportamento dos solos que compõem as unidades geotécnicas, especialmente quando se refere a solos tropicais, ainda pouco estudados a nível mundial. Dias (1995) desenvolveu uma metodologia que visa elaborar um mapa temático composto por unidades de solos com comportamento geomecânico semelhante, estimado por meio de sua gênese. Nessa proposta, os ensaios geotécnicos são importantes para a caracterização física e de resistência dos solos, agregando às unidades propriedades relevantes para a interpretação do seu comportamento.

Na metodologia proposta por Dias (1995), deve-se realizar o cruzamento dos mapas litológico, oriundo de um mapa geológico, e pedológico para a definição preliminar das unidades geotécnicas. De acordo com a autora, para cada unidade geotécnica a geologia permite inferir as características do horizonte de alteração da rocha (horizonte saprolítico) e a pedologia permite inferir características dos horizontes superficiais dos seus perfis típicos.

Higashi (2006) destaca que apesar do grande número de trabalhos na área de mapeamento geotécnico que envolve a análise de suscetibilidade a deslizamentos, poucas são as pesquisas em que os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram determinados por meio de ensaios laboratoriais ou de campo.

2.3.3.2 Espacialização dos dados por geoestatística

Conforme Rodriguez (2013), a geoestatística é um ramo da estatística que une a teoria de variáveis aleatórias com a teoria de variáveis regionalizadas, gerando um novo conceito de funções aleatórias. Por meio dessas técnicas, dentre as quais se destaca a krigagem, é possível calcular um determinado valor de interesse, em que está condicionado aos dados existentes e a uma função de correlação espacial entre eles. Portanto, incorpora-se uma interpretação da distribuição estatística dos dados no espaço.

A principal aplicação da geoestatística em geotecnia tem sido na caracterização da variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos. Assim, podem-se utilizar dados pontuais (resultados dos ensaios geotécnicos) aplicados a mapas de forma a espacializar essas informações e permitir a interpolação e cruzamento dos dados.

2.3.4 Distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizando o modelo matemático SHALSTAB

No Brasil, o modelo SHALSTAB foi aplicado em diversas regiões de clima tropical em estudos que apontam resultados satisfatórios. Em relação à espacialização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, os trabalhos levantados foram divididos em quatro grupos distintos: aqueles que utilizaram dados geotécnicos secundários e constantes para toda a área modelada; aqueles que executaram ensaio para obtenção dos parâmetros geotécnicos, entretanto, utilizaram um valor para cada dado constante em toda a área modelada; aqueles que

utilizaram dados secundários para os parâmetros geotécnicos, mas realizaram a modelagem espacializando esses dados; e, por fim, aqueles que executaram ensaio para obtenção dos parâmetros geotécnicos e, ainda, espacializaram os valores para a modelagem com o SHALSTAB.

Dentre os trabalhos que obtiveram os parâmetros geotécnicos da literatura e utilizaram um valor para toda a área de estudo, pode-se citar: no Rio de Janeiro, em áreas do Maciço da Tijuca, por Fernandes *et al.* (2001), bacias do Quitite e Papagaio por Gomes (2006), em Itatiaia por Carvalho *et al.* (2009), em Paraty por Machado (2011), na Reserva Biológica Federal do Tinguá por Araújo *et al.* (2014), na Serra das Araras por Luiz (2015), em Minas Gerais, na região do Quadrilátero Ferrífero por Ramos *et al.* (2002), em Ouro Preto por Redivo *et al.* (2004) e na bacia do Rio Paraibuna, em Juiz de Fora, por Zaindan e Fernandes (2009), em São Paulo, na bacia do Rio Limoeiro, por Listo e Vieira (2012) e na bacia da Copebrás, no município de Cubatão, por Vieira (2007), na Bahia, no Subúrbio Ferroviário de Salvador por Ramos (2003), no Ceará, na Chapada do Araripe, por Bispo, Listo e Silva (2018), no Espírito Santo, na Ilha de Vitória, por Silva *et al.* (2013), em Santa Catarina, no baixo vale do Rio Luís Alves por Gerente, Luiz e Santo (2014), e no Rio Grande do Sul, na bacia do arroio Forromeco, localizada nos municípios de Bom Princípio, São Vendelino, Carlos Barbosa e Farroupilha, por Riffel, Ruiz e Guasselli (2016).

Dentre os trabalhos que executaram ensaio para obtenção dos parâmetros geotécnicos e utilizaram um valor constante em toda a área modelada, pode-se citar: no Rio de Janeiro, em Petrópolis, por Silva (2006), em São Paulo, na bacia do Ribeirão Guaratinguetá, município de Guaratinguetá, por Benessiuti (2011) e em Santa Catarina, na bacia do Rio Cunha, em Rio dos Cedros, por Michel, Goerl e Kobiyama (2015).

Os trabalhos que utilizaram dados secundários para os parâmetros geotécnicos, mas implementaram espacialização na modelagem, são aqueles que realizaram a distribuição por unidades geotécnicas: no Rio Grande do Sul, bacia do arroio Jaguar nos municípios de Alto Feliz e São Vendelino, por Melo (2018), por unidades pedológicas: no Distrito Federal, bacia do Ribeirão Contagem, por Azevedo, Carvajal e Souza (2015), e em Santa Catarina, no alto vale das bacias do Arraial do Ouro, em Gaspar, do Ribeirão Baú e do Braço do Baú, em Ilhota, por Bini (2020).

Para os estudos que executaram ensaios de cisalhamento para obtenção dos parâmetros geotécnicos e, ainda, realizaram a distribuição espacial desses parâmetros na modelagem, todos os pesquisados se localizam em Santa Catarina, citam-se aqueles que espacializaram por meio de unidades geotécnicas: na bacia do Rio Cunha, em Rio dos Cedros, por Reginatto (2013), na bacia do Ribeirão Baú, em Ilhota, por Sbroglia (2015), Degering (2018) e Flach (2020), na área urbana do município de Antônio Carlos por Guesser (2016), na bacia do Rio Forquilhas, em São José, por Rosolem *et al.* (2017), na bacia do Saco Grande, em Florianópolis, por Silveira (2017) e em um trecho da BR-280, nos municípios de Corupá e São Bento do Sul, por Oliveira *et al.* (2017); aquele que espacializou por unidades geotécnicas geomorfo-pedogeológicas: no município de Timbó por Nau (2018); e unidades pedogeológicas em Blumenau por Peruzzo (2018); e aqueles que espacializaram por geoestatística: em Jaraguá do Sul por Tabalipa (2019), na bacia do Ribeirão das Pedras por Bim (2015) e na bacia do Itacorubi por Caraméz (2017), em Florianópolis, e na Ilha de Santa Catarina por Christ (2019).

2.3.5 Validação das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos

De acordo com Beguería (2006), a validação permite estabelecer certo grau de confiança aos cenários elaborados, o qual é um fator relevante quando se apresenta um mapa de suscetibilidade a deslizamentos ao gestor ou usuário final, uma vez que decisões podem ser tomadas levando-se em consideração sua acurácia e poder preditivo, além de possibilitar comparações entre diferentes métodos de análise de estabilidade.

2.3.5.1 Inventário de deslizamentos

O inventário de deslizamentos é um elemento fundamental na análise de estabilidade das encostas, pois possibilita a validação dos cenários de suscetibilidade produzidos. Destaca-se que o inventário a ser utilizado está, geralmente, associado a um mapa e a uma base de dados georreferenciada. Dessa forma, a representação gráfica da cicatriz poderá ser apenas um ponto (centróide), o polígono da superfície de ruptura ou a totalidade do deslizamento.

Basicamente, o inventário depende dos elementos morfológicos nas cicatrizes possíveis de serem identificados durante as saídas de campo e fotointerpretação. No caso de

eventos antigos, como é o caso do desastre natural de novembro de 2008 (Figura 25), uma parte significativa das evidências de ocorrência de deslizamentos deixou de ser identificável ao longo do tempo devido a processos naturais e/ou interferências antrópicas, como processos erosivos, outros movimentos de massa, recomposição da vegetação, ocupação urbana, entre outros.

Figura 25 - Foto, a esquerda, de um deslizamento com fluxo de detritos de grandes proporções tirada logo após o desastre de novembro 2008, em dezembro de 2008, e foto, a direita, do mesmo deslizamento tirada quatro anos após, em agosto de 2012.

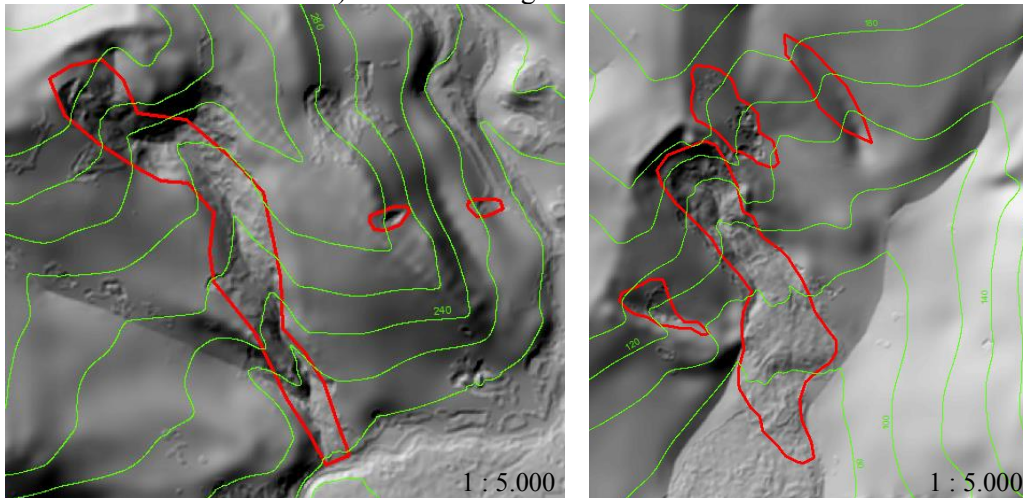


Fonte: Foto, a esquerda, fornecida por Nelson Fernandes; foto, a direita, da Autora.

Em relação à análise de fotos aéreas e imagens de satélite, as principais informações extraídas durante a identificação e localização das cicatrizes estão relacionadas à textura, conformação, padrão, tonalidade e cor correlacionadas intimamente com alterações morfológicas e mudanças nos padrões de vegetação e nas condições de drenagem (BARELLA, 2016). A morfologia é favorecida pela utilização de exauros verticais.

Na análise das curvas de nível, como foi realizada para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (Figura 26), as zonas de ruptura e de passagem dos sedimentos deslizados alteraram-se para côncavas, ou seja, curvas de nível arqueadas para cima; na zona de deposição dos deslizamentos, situada na base das encostas, as curvas de nível apresentam-se arqueadas para baixo (convexa), indicando a acumulação de materiais depositados. A escarpa arqueada situada no limite superior da cicatriz tem origem na remoção e transporte do material deslizado, sendo normalmente demarcada por uma mudança acentuada de declividade.

Figura 26 - Aspecto das curvas de nível (em verde) nas áreas de ocorrência de deslizamentos (em vermelho) na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: elaborado pela Autora.

Em geral, não se dispensa a devida atenção à influência da representação gráfica dos movimentos de massa na validação dos mapas de suscetibilidade. E, ainda, há comparações entre os resultados finais sem levar em consideração o método do levantamento do inventário de cicatrizes e sua representação. Cita-se o trabalho de Flach (2020), que empregou o mesmo modelo para elaboração dos cenários de suscetibilidade (SHALSTAB) para a mesma área de estudo (bacia hidrográfica do Ribeirão Baú) e comparou seu resultado com Sbroglia (2015), que utilizou um ponto (centróide) nas superfícies de ruptura para a validação. Destaca-se que seria mais apropriada a comparação dos resultados obtidos com Sbroglia *et al.* (2018), no qual se estimou, em cada polígono da superfície de ruptura do deslizamento, o *pixel* de valor mínimo de instabilidade, mesmo método utilizado por Flach (2020).

Nesse contexto, salienta-se a necessidade em dar a devida importância ao levantamento e representação gráfica do inventário de deslizamentos da área em estudo para evitar a propagação de erros nos mapas subsequentes de suscetibilidade e na validação.

2.3.5.2 Métodos de validação

Levando-se em consideração que um mapa de suscetibilidade é mais adequado quanto maior for a sua capacidade de antecipar a localização dos deslizamentos futuros, diversos métodos têm sido propostos para validar os cenários modelados, com destaque para as

Tabelas de Contingência ou Matriz de Confusão, Curvas *Receiver Operating Characteristic* (ROC), Curvas de Sucesso e Predição e cálculo da Área Abaixo da Curva (AAC).

A Tabela de Contingência ou Matriz de Confusão tem sido utilizada como um teste estatístico que permite avaliar de forma simples os eventos observados (inventário) e os eventos preditos pelo modelo a partir da separação dos dados de forma binária: presença/ausência de deslizamento. Destaca-se que para o sucesso dessa abordagem é necessária a definição de um ponto de corte para divisão da área de estudo entre estável e instável (BEGUERÍA, 2006). Dessa forma, são possíveis quatro resultados: verdadeiro positivo (instabilidade observada e predita pelo modelo); verdadeiro negativo (instabilidade não observada e não predita pelo modelo); falso positivo (instabilidade não observada, mas predita pelo modelo); falso negativo (instabilidade observada, mas não predita pelo modelo), conforme se pode observar no Quadro 8.

Quadro 8 - Tabela de Contingência para validação dos cenários, sendo: VP - verdadeiro positivo, FP - falso positivo, FN - falso negativo e VN - verdadeiro negativo.

		Deslizamentos do inventário (realidade)	
		sim	não
Deslizamentos preditos (modelo)	sim	VP	FP
	não	FN	VN

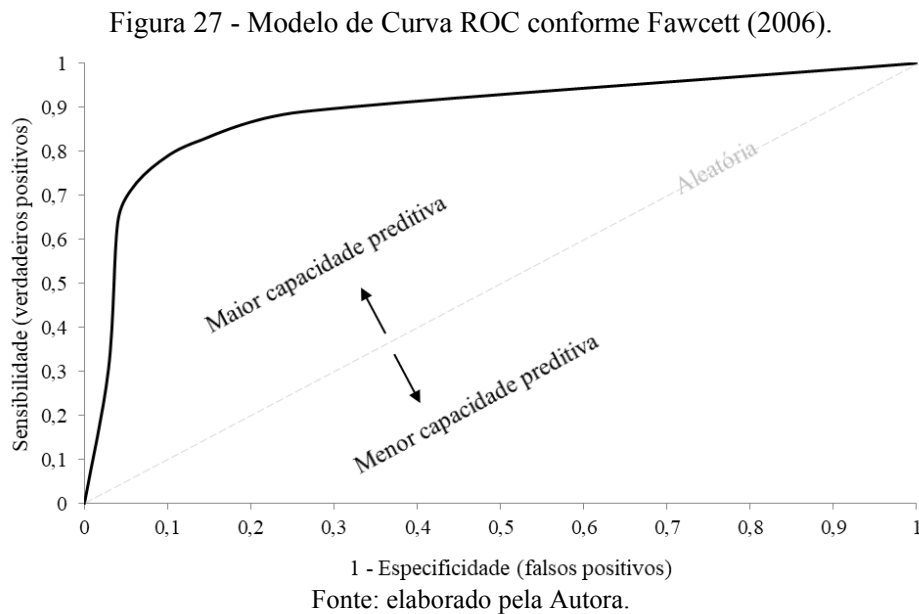
Fonte: adaptado de Beguería (2006).

A partir dos valores observados na Tabela de Contingência ou Matriz de Confusão é possível se obter as seguintes estatísticas de precisão: eficiência (proporção de acertos), especificidade (verdadeiros negativos), sensibilidade (verdadeiros positivos) e avaliar os casos supostamente mal classificados (falsos positivos e falsos negativos) (BEGUERÍA, 2006).

A elaboração das curvas *Receiver Operating Characteristic* (ROC) permite avaliar o desempenho de um modelo por meio dos falsos positivos (eixo das abscissas) *versus* os verdadeiros positivos (eixo das ordenadas). Logo, para cada ponto da curva ROC é determinado um par de valores taxa de especificidade (inverso da especificidade) e sensibilidade. Esses valores indicam a capacidade que o modelo tem para maximizar a quantidade de verdadeiros positivos (deslizamentos) em relação à menor incidência de falsos positivos possíveis (provável erro), o que resulta na inclinação da curva (BEGUERÍA, 2006).

Dessa forma, de acordo com Fawcett (2006), curvas ROC que são mais arqueadas para o canto superior esquerdo, apresentam melhores resultados. Ainda, uma curva representada por

uma linha diagonal iniciando no 0 e finalizando no 1, possui uma classificação aleatória, sendo que abaixo dessa curva (triângulo inferior direito) possui um desempenho pior que aleatório (Figura 27).

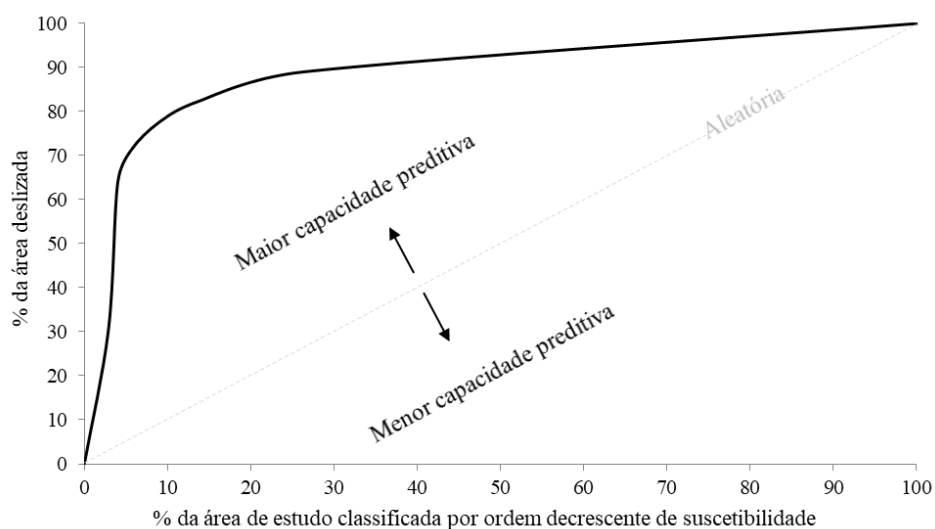


As curvas de Sucesso e Predição foram propostas por Chung e Fabbri (1999) e podem ser consideradas o método de validação mais empregado em análises de suscetibilidade das encostas (ZÊZERE, 2002; REMONDO *et al.*, 2003; DEMOULIN; CHUNG, 2007; GARCIA; ZÊZERE; OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA, 2012; PARIZOTO, 2014; BARELLA, 2016; DENG; LI; TAN, 2017; SBROGLIA *et al.*, 2018b; NAU, 2018; BINI, 2020). As curvas são elaboradas a partir de um gráfico em porcentagem acumulada da área de estudo (eixo das abscissas), classificada em ordem decrescente de suscetibilidade, *versus* a porcentagem acumulada da área deslizada (eixo das ordenadas). O cenário com maior capacidade preditiva será aquele com menor porcentagem da área de estudo necessária para enquadrar a maior porcentagem da área deslizada.

Nesse sentido, o cenário é considerado como altamente preciso quando 90% dos deslizamentos ocorrem em até 5% de áreas instáveis, e com pouca precisão quando 40% dos deslizamentos ocorrem em 30% de áreas instáveis. Logo, quanto mais rapidamente a curva se distanciar do eixo das abscissas, alcançando a proporção de 100% das células deslizadas, melhor será a confiabilidade do modelo e a sua capacidade preditiva (Figura 28). Destaca-se que uma

curva coincidente com uma diagonal, partindo do 0 até o 100%, conforme demonstrado na Figura 28, equivale a uma predição totalmente aleatória, e inferior à linha diagonal evidencia um cenário com predição inferior ao aleatório, devendo ser desconsiderado (CHUNG; FABBRI, 2003; REMONDO *et al.*, 2003).

Figura 28 - Modelo de Curva de sucesso ou predição conforme Chung e Fabbri (1999).



Fonte: elaborado pela Autora.

A diferença entre as curvas de Sucesso e de Predição reside na parcela do inventário a ser utilizada. Para a elaboração da curva de Sucesso utiliza-se a parte do inventário empregada na modelagem, logo, seu resultado diz respeito ao melhor ajustamento entre o modelo e os deslizamentos mapeados. Para a elaboração da curva de Predição, por sua vez, utiliza-se a outra parte do inventário, dessa forma, seu resultado tende a avaliar a capacidade do modelo em prever futuros deslizamentos (CHUNG; FABBRI, 2003).

Isso quer dizer que o inventário deve ser dividido em dois grupos independentes, sendo um grupo utilizado na calibração do modelo e o outro na validação. Dessa forma, Chung e Fabbri (2003) propuseram o particionamento do inventário por meio de três métodos: temporal, considerado um dos mais adequados para a análise; espacial, em duas subáreas; e aleatório, ou seja, uma distribuição irregular que tende a cobrir toda a área de estudo.

Por fim, com o intuito de avaliar de forma quantitativa a capacidade preditiva de um modelo e comparar diferentes resultados gráficos pode-se recorrer, alternativamente, à determinação da Área Abaixo da Curva (AAC) ou *Area Under the Curve* (AUC) (HANLEY;

MCNEIL, 1982). Dessa forma, assumindo que a curva é composta por pequenos segmentos de reta, é possível calcular a área situada entre as curvas ROC ou de Sucesso e Predição e o eixo das abscissas (BEGUERÍA, 2006). Assim, os valores de AAC permitem definir com maior rigor as modelagens com maior capacidade preditiva, mesmo que as respectivas curvas se apresentem muito semelhantes.

Os valores de AAC variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior é a precisão do cenário, enquanto valores de 0,5, expresso pela linha diagonal, estão associados a uma classificação aleatória, e valores abaixo de 0,5 relacionam-se a capacidade preditiva pior que o aleatório (BEGUERÍA, 2006). Importante destacar que cenários com o mesmo valor de AAC não estão relacionados a uma distribuição espacial semelhante das classes de suscetibilidade, mesmo mantendo constante a proporção de movimentos incidentes em cada classe (BARELLA, 2016).

Alguns autores propuseram, ainda, uma classificação das modelagens por meio de limiares para a AAC, conforme apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 - Limites para a classificação das modelagens por meio dos valores de AAC para diferentes autores.

Classificação	Swets (1988)	Guzzetti (2005)	Thuiller <i>et al.</i> (2010)
Excelente ou Extremamente Satisfatória	> 0,90 - 1,00	> 0,90 - 1,00	> 0,90 - 1,00
Boa ou Muito Satisfatória	-	>0,80 - 0,90	>0,80 - 0,90
Aceitável ou Razoável	>0,70 - 0,90	0,75 - 0,80	>0,70 - 0,80
Fraca	0,50 - 0,70	-	>0,60 - 0,70
Muito Fraca	-	-	0,50 - 0,60

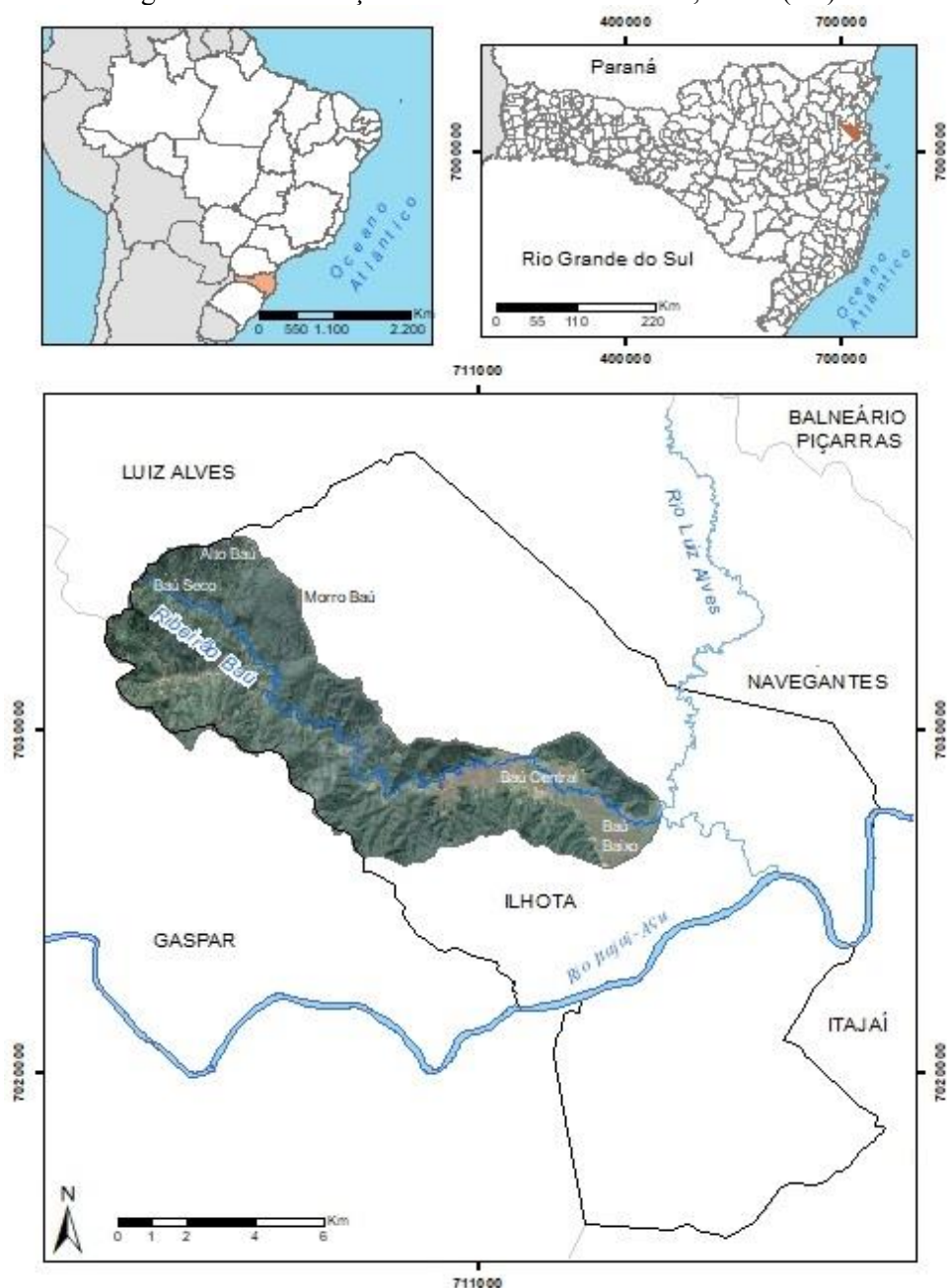
Fonte: adaptado de Barella (2016).

Mesmo na eventual presença de um modelo preditivo perfeito, dificilmente será obtido o valor de AAC igual a 1. No caso das curvas de Sucesso e Predição, o valor máximo da AAC estará relacionado ao total de área deslizada utilizada para validar os cenários de suscetibilidade, ou seja, se a área instabilizada representa 5% da área estudada, serão necessários, no mínimo, 5% da totalidade da área para validar esses mesmos deslizamentos (OLIVEIRA, 2012). Dessa forma, espera-se que a AAC reduza em relação ao aumento do número de deslizamentos mapeados. De acordo com Oliveira (2012), um incremento de 5% da área instabilizada promove uma alteração de 0,025 no valor de AAC, assim, o autor propôs uma correção dos limiares de classificação das modelagens.

3 ÁREA DE ESTUDO

O Ribeirão Baú pertence à bacia hidrográfica do Rio Luiz Alves, como afluente de sua margem direita, e, em menor escala, pertence à bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu. A bacia do Ribeirão Baú localiza-se na porção noroeste do município de Ilhota (SC) e apresenta área de 62,7 km² (Figura 29).

Figura 29 - Localização da bacia do Ribeirão Baú, Ilhota (SC).

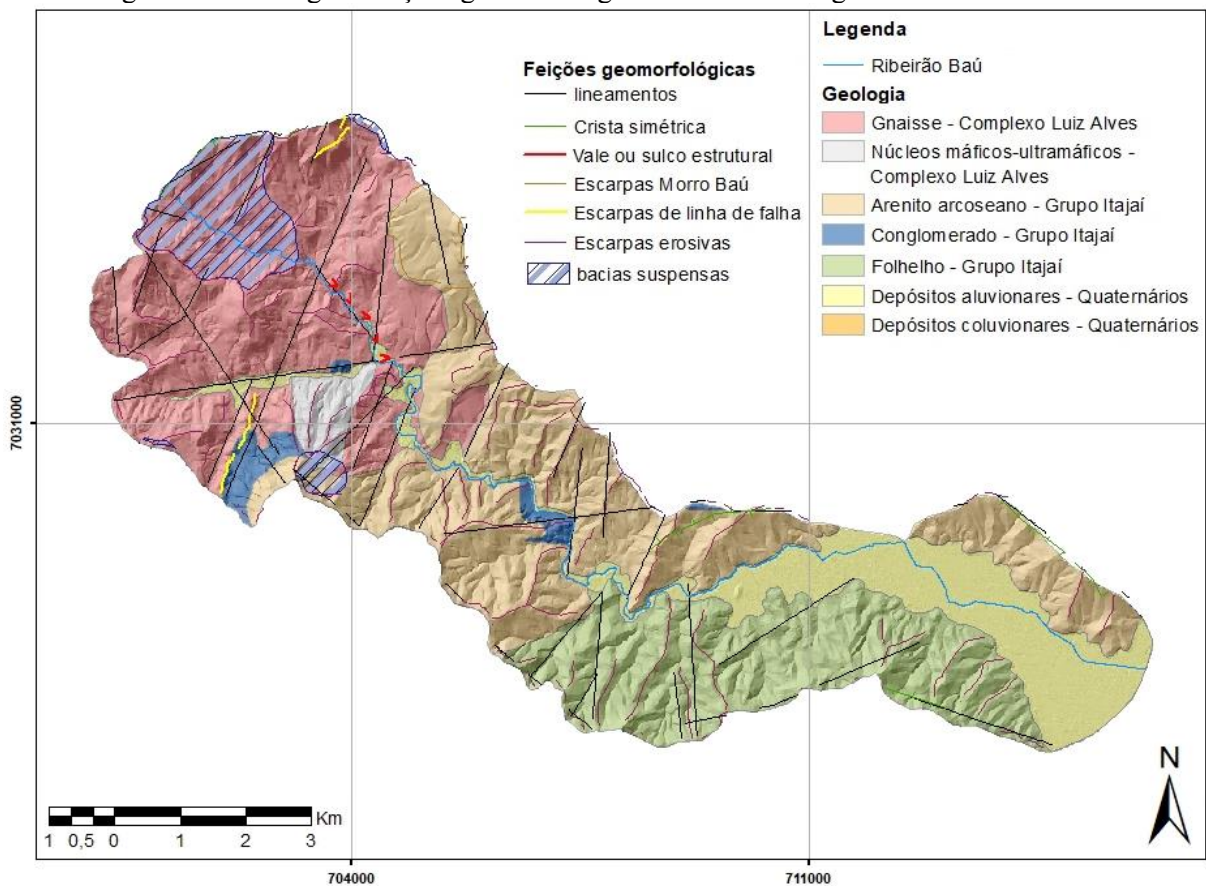


Fonte: elaborado pela Autora.

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOMORFOLÓGICAS

A bacia é composta pelos domínios geológicos e litológicos: Complexo Luiz Alves - gnaisse e núcleos máficos-ultramáficos, Grupo Itajaí - arenito arcoseano, conglomerado e folhelhos, e Sedimentos Quaternários - depósitos aluvionares e coluvionares (Figura 30).

Figura 30 - Geologia e feições geomorfológicas da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: adaptado de Sbroglia (2015).

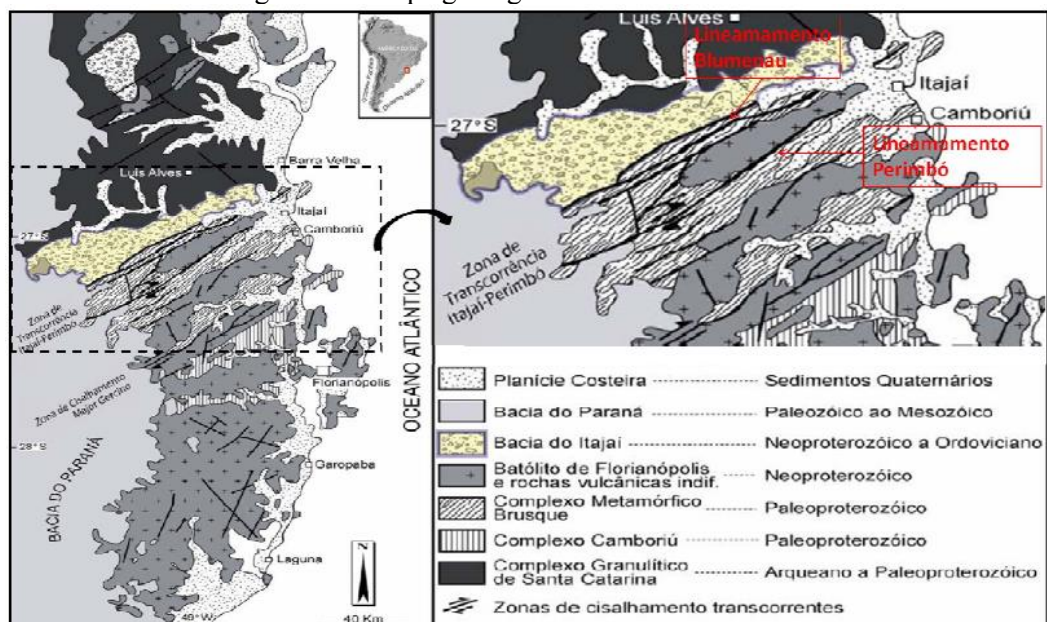
O Complexo Luiz Alves ocorre nas cotas mais altas e é representado, na maior parte, pelo gnaisse. Essas rochas são as mais antigas do Estado, formadas no período Arqueano (mais de 2,5 bilhões de anos atrás), com eventos retro-metamórficos relacionados ao paleoproterozóico e neoproterozóico. Caracteriza-se por rochas metamorizadas na fácies granulito e anfibolito. Além do hiperstênio, horblenda e biotita, são constituídos por plagioclásio, feldspato potássico e quartzo, além de minerais secundários como clorita e sericita

provenientes de alterações hidrotermais (ÉGAS, 2011; KAUL; FERNANDES; SANTOS NETO, 2002; FLORES *et al.*, 2017).

Os ganisses granulíticos costumam apresentar planos de bandamento com direções variadas, podendo se apresentar dobrados. Exibem, com frequência, enclaves máficos ou ultramáficos de diversos tamanhos, com formas angulosas ou arredondadas e diferentes estágios de assimilação (FLORES *et al.*, 2017). Destaca-se que locais com presença de bandamento mergulhando para fora da encosta são mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos devido ao intemperismo diferencial ao longo das diferentes bandas as quais, invariavelmente, representam as superfícies de ruptura. Por sua vez, bandamento mergulhando para o interior da encosta é considerado mais favorável à estabilidade.

Essa rocha apresenta-se cortada por numerosas falhas e zonas de cisalhamento, com destaque para o lineamento ou zona de cisalhamento Perimbó, com características rúpteis-dúcteis e direção principal N55°E (Figura 31), que coloca as rochas desse complexo em contato com as rochas do Grupo Itajaí (SCHROEDER, 2006; FLORES *et al.*, 2017). Essas estruturas controlam os vales fluviais profundos e retilíneos que apresentam encostas com alta declividade, onde ocorreram movimentos de massa de grandes proporções condicionados pelo relevo acidentado associado a solos espessos. Esses vales, muitas vezes, são preenchidos por depósitos sedimentares colúvio-aluvionares (TOMAZZOLI *et al.*, 2012).

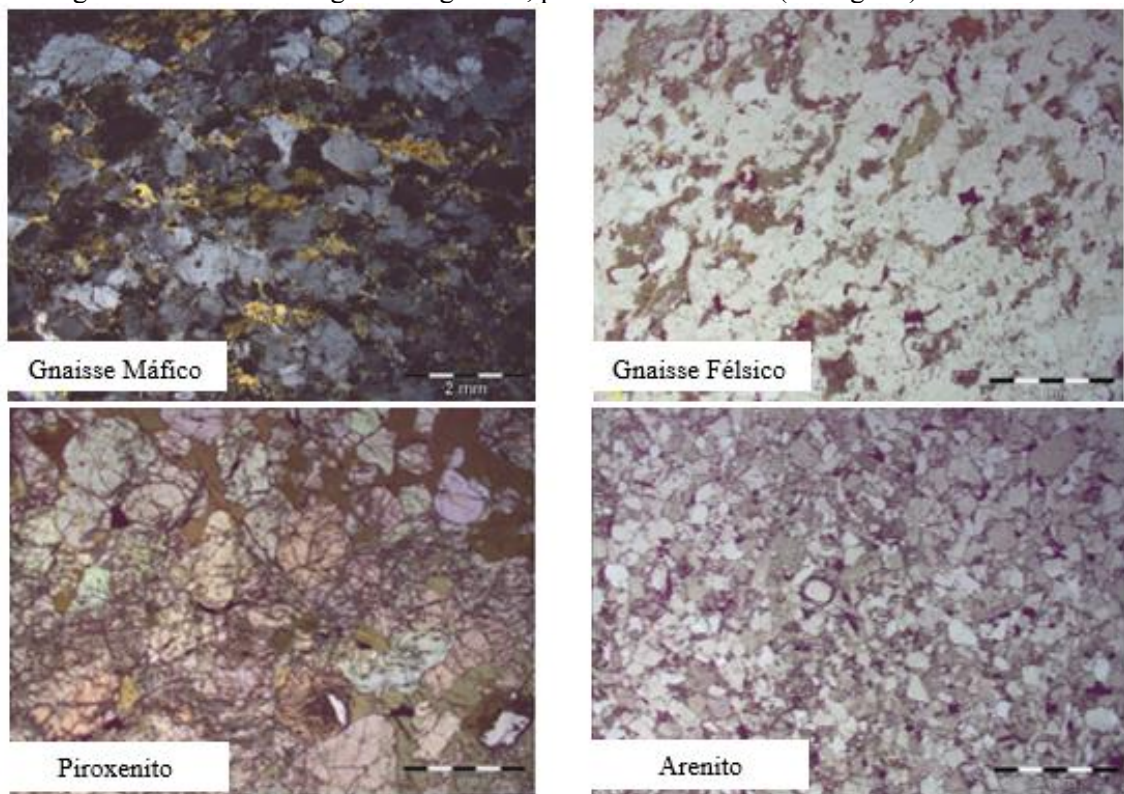
Figura 31 - Mapa geológico do escudo catarinense.



Fonte: Égas (2011), adaptado de Chemale Jr. *et al.* (2003).

A rocha piroxenito, pertencente aos chamados núcleos máficos e ultramáficos do Complexo Luiz Alves possui coloração escura. Apresenta textura equigranular geralmente grossa, cujo principal mineral é o piroxênio, com ausência de feldspato (ÉGAS, 2011). Ao microscópio exibem plagioclásio, augita, pigeonita, hiperstênio e óxidos de ferro titânio como minerais essenciais; horblenda, actinolita, biotita e clorita como minerais secundários, de origem metamórfica ou hidrotermal (TOMAZZOLI *et al.*, 2012), Figura 32.

Figura 32 - Lâminas delgadas de gnaiss, piroxenito e arenito (vista geral) - luz natural.



Fonte: adaptado de Égas (2011).

A área do Complexo Luiz Alves caracteriza-se pelo relevo montanhoso, configurando-se como um modelado de dissecação com vales bem encaixados fechados, podendo conter terraços alveolares, topos extensos convexo-côncavos e vertentes com diferentes graus de inclinação por vezes desdobradas em patamares, variando a declividade entre 45% e 75% (24 a 37°). Ocorrem geralmente como resultado da intensa erosão fluvial em decorrência do sistema morfoclimático quente e úmido atuante na área (ROSA, 2002).

De acordo com Égas (2011), o relevo ainda apresenta escalonamentos e desenvolvimento de bacias suspensas, como no Ribeirão Baú Seco, feições geomorfológicas de

facetas triangulares e quebra de declividades nos perfis longitudinais dos rios indicam presença de falhas com reativação recente, como pode ser observado na Figura 31.

O Grupo Itajaí, por sua vez, foi mapeado no Morro Baú e na área central da bacia. Consiste em sedimentos depositados no final do Proterozóico Superior (há cerca de 500 milhões de anos atrás), correspondendo a uma bacia molássica brasileira localizada sobre os granulíticos do Complexo Luiz Alves, limitado por falhas e zonas de cisalhamento. A Bacia do Itajaí (Grupo Itajaí), segundo Schroeder (2006), é combinada da base para o topo de conglomerado e arenitos de leques aluviais, pacotes em que predominam arenitos com geometria sigmoidal de frente deltaica, depósitos de conglomerados e arenitos com estratificações festonadas de origem fluvial, ritmitos turbidíticos e pelitos marinho profundo.

Em sua porção basal, ocorrem arenitos arcoseanos associados a conglomerados (Conglomerado Baú). Essas rochas ocorrem em camadas superpostas com pequenas a médias inclinações para sul-sudeste, constituindo elevações do tipo mesa ou em forma de cuesta, devido às inclinações mais pronunciadas. O Morro Baú pode ser interpretado como uma elevação desse tipo, sendo constituído pela superposição de camadas inclinadas de conglomerado e arenito que estão fortemente cimentadas por sílica, conferindo grande resistência dessas rochas à erosão diferencial (TOMAZZOLI; FLORES; BAUZYS, 2009).

Os arenitos arcosianos ou arcósios contêm mais de 25% de feldspato de origem detrítica, além de quartzo e fragmentos líticos (Figura 32). O conglomerado é uma rocha formada por seixos e areia grossa agrupados por um cimento químico, formando um depósito consolidado. Essa rocha é composta principalmente por quartzo, quartzito e rocha granítica, com alto grau de coesão quando não intemperizado (ÉGAS, 2011).

As rochas sedimentares do Grupo Itajaí são muito fraturadas, algumas vezes dobradas (pequenas ondulações) na direção NW/SW e NW, e apresentam localmente mergulhos de direções variáveis, com predomínio para NE (FLORES *et al.*, 2017). O relevo é caracterizado pela alternância entre tipos de modelados de dissecação, que resultaram em colinas e morrarias de pequena amplitude altimétrica, com vertentes convexizadas. Os rios que drenam as planícies apresentam geralmente vale de fundo plano e eventualmente em “V” aberto. Apresenta, ainda, contato bem marcado na paisagem com as planícies aluviais (ROSA, 2002).

Por último, os Depósitos Quaternários englobam tanto os terraços arenosos antigos, possivelmente pleistocênicos, como os depósitos de pé de encosta e os aluviões subatuais. São

constituídos, geralmente, por uma alternância de níveis ou lentes arenosas e argilosas, mal selecionadas, com a presença frequente de horizontes de seixos e calhaus, os quais se tornam mais expressivos próximos às áreas fontes. A estratificação cruzada é frequente, bem como o acamadamento gradacional e estruturas de colapso (ÉGAS, 2011).

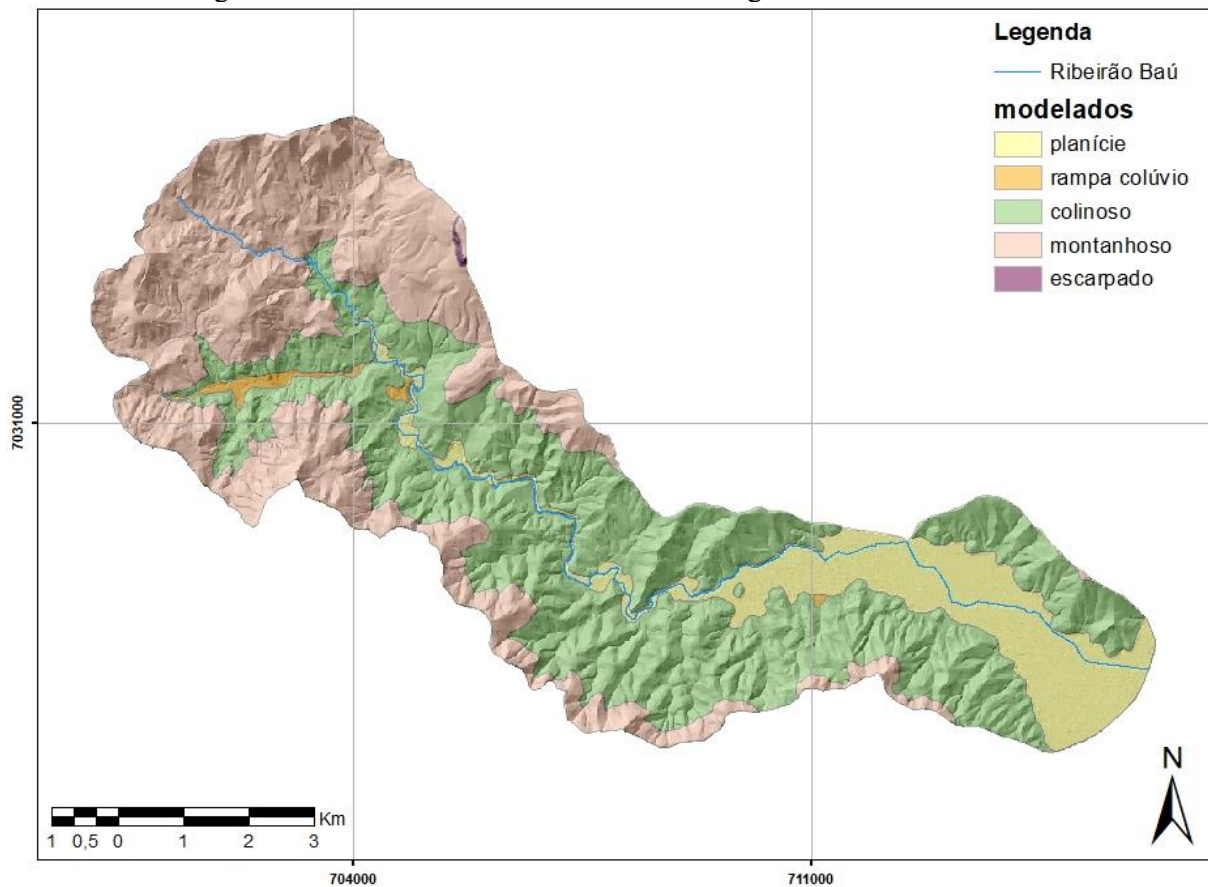
Os depósitos de colúvio-elúvio e aluviões recentes, de idade Holocênica, ocorrem comumente na forma de rampas constituindo os depósitos entre a média e baixa encostas, principalmente côncavas e retilíneas, e são constituídos por sedimentos inconsolidados, com grande variação granulométrica, incluindo depósitos areno-argilosos e areno-siltico argilosos, com estratificação incipiente ou ausente, incluindo depósitos *in situ*. Nos vales mais encaixados ou mais estreitos, os depósitos coluviais preenchem os talwegues e recobrem terrenos aluviais (KAUL; FERNANDES; SANTOS NETO, 2002; FLORES *et al.*, 2017).

Os depósitos aluvionares localizam-se em maior área a Leste da bacia, em planície de inundação, terraços e calhas da rede fluvial no período Holocênico, e são constituídos por areias, cascalheiras e sedimentos siltico-argilosos inconsolidados (KAUL; FERNANDES; SANTOS NETO, 2002). Caracterizam-se como modelado de acumulação em terraço aluvial, e por ser uma área plana, levemente inclinada, apresenta rupturas de declive em relação ao leito do rio e às várzeas (ROSA, 2002). Para os modelados de acumulação, as declividades dos terrenos apresentam-se inferiores a 5° nas planícies flúvio-aluvionares e entre 5° e 10° nas rampas coluviais e colúvio-aluvionares associados às baixas encostas (FLORES *et al.*, 2017).

A Figura 33 apresenta o mapa com os modelados de relevo elaborado com base nos dados levantados por Tomazzoli *et al.* (2012), sendo divididos, do mais declivoso ao mais suave, em: escarpado, montanhoso, colinoso, rampas de colúvio e planície aluvial.

O relevo escarpado ocupa 0,07km² (0,1%), montanhoso 24,07km² (38%), colinoso 29,69km² (47%), rampas de colúvio 0,52km² (1%) e a planície 8,38km² (13%) da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

Figura 33 - Modelados de relevo na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: elaborado pela Autora.

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Na elaboração do mapa geotécnico por Sbroglia (2015), foi empregada a metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas desenvolvida por Dias (1995). Esse método visa estimar a partir de dados geológicos, pedológicos e topográficos as unidades geotécnicas de uma determinada área, ou seja, unidades de solos com comportamento geotécnico semelhante com base na sua gênese.

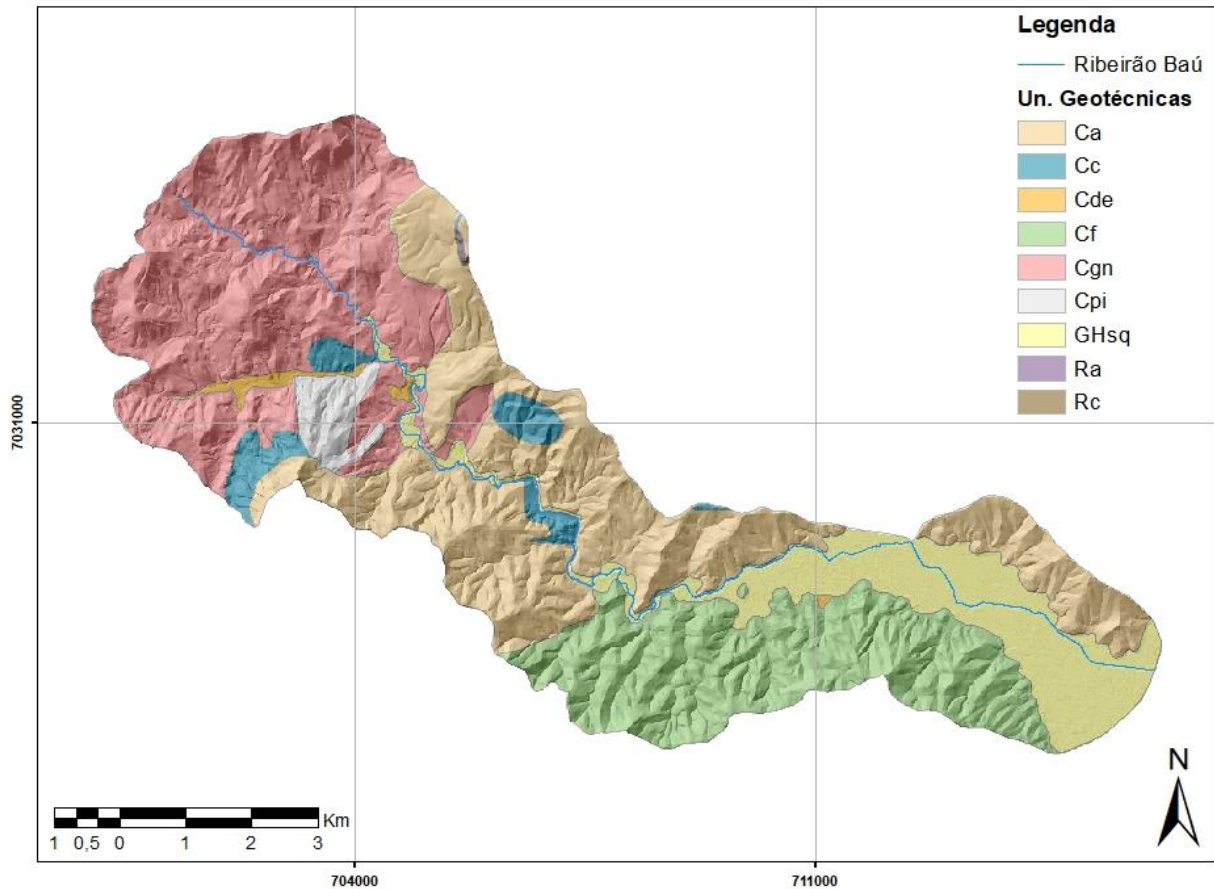
No mapeamento geotécnico da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú realizado, foram geradas nove unidades geotécnicas, sendo sete resultantes de solos residuais e duas de solos sedimentares, representadas na Figura 34 e descritas as principais características no Quadro 10.

Quadro 10 - Características gerais das unidades geotécnicas.

Unidade Geotécnica		Área	Relevo Predominante	Geologia	Pedologia
Ra	Litólico substrato arenito	0,03km ² 0,04%	Escarpado, com declividades >75%, (escarpa monoclinal do Morro do Bau)	Grupo Itajaí	Rocha sã e solo litólico com reduzidas porções de materiais grosseiros não consolidados provenientes da desagregação das rochas
Rc	Litólico substrato conglomerado	0,03km ² 0,04%	Escarpado, com declividades >75%, (escarpa monoclinal Morro do Bau)	Grupo Itajaí	Rocha sã e solo litólico com reduzidas porções de materiais grosseiros não consolidados provenientes da desagregação das rochas
Cgn	Cambissolo substrato gnaisse	19,3km ² 30,8%	Encostas com alta declividade - forte ondulado (20 a 45%) a montanhoso (45 a 75%). Áreas com relevo muito íngreme, com declividades >75%	Complexo Luiz Alves	Cambissolo álico e em pequenas áreas distrófico, textura arenosa com horizonte C profundo e horizonte B incipiente, sem aquífero freático próximo à superfície
Cpi	Cambissolo substrato piroxenito	1,35km ² 2,15%	Forte ondulado e, em menor área, ondulado (8 a 20%)	Complexo Luiz Alves	Cambissolo álico, atividade da argila baixa, textura argilosa e de coloração avermelhada
Ca	Cambissolo substrato arenito	18,6km ² 29,6%	Forte ondulado e montanhoso e em menor ocorrência apresenta relevo ondulado	Grupo Itajaí	Cambissolo álico, atividade da argila baixa, textura arenosa, horizonte C profundo e horizonte B não hidromórfico marrom
Cc	Cambissolo substrato conglomerado	2,12km ² 3,4%	Forte ondulado e ondulado	Grupo Itajaí	Cambissolo álico, atividade da argila baixa, textura argilosa, horizonte C profundo e horizonte B não hidromórfico
Cf	Cambissolo substrato folhelho	12,3km ² 19,7%	Forte ondulado e montanhoso e, em menor parte, ondulado	Grupo Itajaí	Cambissolos álicos com argila de atividade alta ou baixa, dependendo da presença de minerais expansivos, textura siltosa e presença ou não de seixos
Cde	Cambissolo substrato depósito de encostas	0,52km ² 0,82%	Ondulado, porém, algumas áreas apresentam relevo suave ondulado (3 a 8%)	Depósitos coluviais do período Quaternário	Cambissolo distrófico, argila com atividade baixa, horizonte A moderado, B incipiente e C profundo, textura argilosa e siltosa, não hidromórfico
GHsqa	Gleissolo substrato sedimentos quaternários aluviais	8,4km ² 13,4%	Plano, com áreas levemente inclinadas ou horizontais. Os desnivelamentos são suaves, com inclinações entre 0 e 3%	Depósitos aluviais do período Quaternário	Solo hidromórfico, distrófico e álico, horizonte A moderado e proeminente textura arenosa, coloração marrom e acinzentado

Fonte: adaptado de Sbroglia (2015).

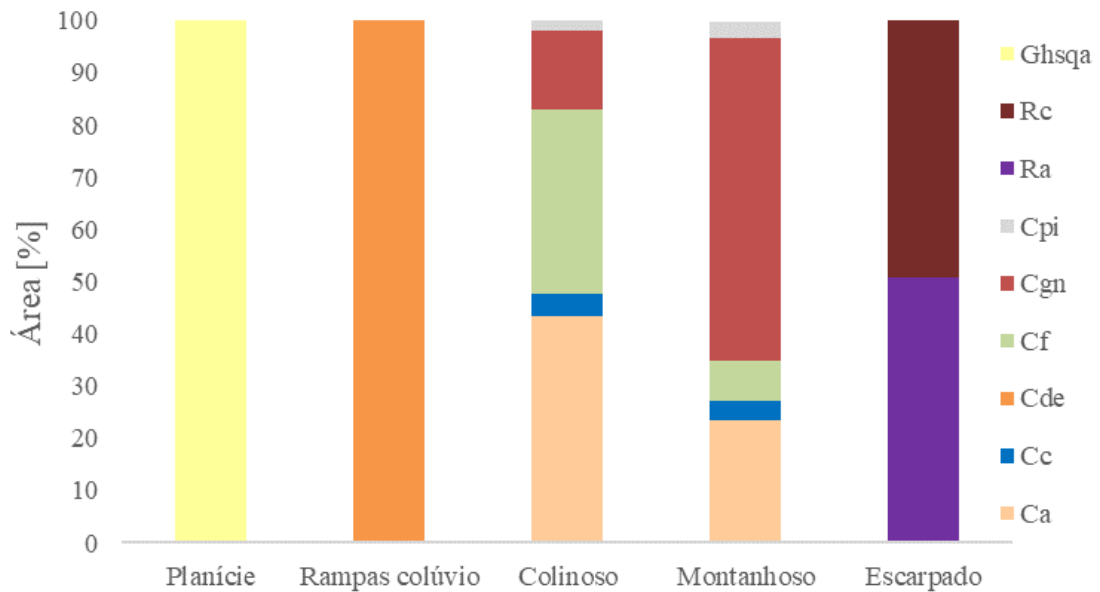
Figura 34 - Unidades geotécnicas na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: adaptado de Sbroglia (2015).

Em relação aos modelados de relevo e unidades geotécnicas, apresentados nas Figuras 33 e 34, respectivamente, foi elaborado o gráfico da Figura 35. Observa-se que a unidade geotécnica GHsq e Cde ocupam inteiramente (100%) os tipos de relevo de planície e rampas de colúvio, respectivamente. No relevo colinoso localiza-se 43% da unidade geotécnica Ca, 35% de Cf, 15% de Cgn, 4% de Cc e 2% de Cpi. No modelado de relevo montanhoso, por sua vez, localiza-se 62% de Cgn, 24% de Ca, 8% de Cf, 4% de Cc e 3% de Cpi. E, por fim, o relevo escarpado é composto pelas unidades geotécnicas Ra (51%) e Rc (49%).

Figura 35 - Unidades geotécnicas por tipo de relevo na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.





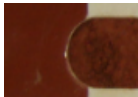




Fonte: elaborado pela Autora.

Para a caracterização física e de resistência ao cisalhamento dos solos das unidades geotécnicas mapeadas, foram coletadas amostras deformadas e, nas unidades de solos residuais, indeformadas, no horizonte C dos locais definidos como o início do deslizamento (superfície de ruptura) (SBROGLIA, 2015). Os resultados dos ensaios de caracterização física são apresentados na Tabela 7.

Cabe ressaltar que nas unidades geotécnicas Litólico com substrato de arenito e com substrato de conglomerado (Ra e Rc, respectivamente) não foi possível a coleta de amostra de solo devido à dificuldade de acesso à área, por possuir relevo muito declivoso e por possuir cobertura de solo inexistente ou incipiente, logo, não se caracterizam como uma área suscetível à ocorrência de deslizamentos.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização física.

Ensaio geotécnicos		Unidades Geotécnicas						
		Ca	Cc	Cf	Cgn	Cpi	Cde	GHsqa
Cor (MUNSELL, 1971)		5YR 4/6	10YR 7/4	2.5YR 5/3	7.5YR 7/4	2.5YR 3/6	5YR 6/8	10YR 3/4
								
Granulometria [%]	Argila	23,5	33,4	12,2	5,8	52,7	34,0	8,6
	Silte	29,0	22,9	49,7	16,8	25,2	20,2	24,7
	Areia F.	22,8	27,4	36,3	23,4	10,1	19,3	49,4
	Areia M.	23,9	11,2	1,7	21,9	6,8	9,1	14,4
	Areia G.	0,7	4,5	0,1	22,6	3,4	8,7	2,7
	Pedregulho	0,0	0,6	0,0	9,4	1,8	8,7	0,2
Umidade natural [%]		23,3	33,8	25,9	18,3	46,2	50,4	31,1
Massa específica δ		2,76	2,76	2,70	2,87	3,02	3,21	2,70
Limites de consistência	LL [%]	41	52	35	NL	72	50	NL
	LP [%]	30	32	26	NP	60	46	NP
	IP [%]	11	20	9	NP	12	4	NP
Classificação	IP x LL	med. plástico	alt. plástico	med. plástico	-	med. plástico	pouco plástico	-
Característica	MCT	expansivo	não expansivo	expansivo	expansivo	não expansivo	não expansivo	expansivo
Atividade da Argila		0,47	0,60	0,74	-	0,23	0,12	-
Classificação Atv. Argila		inativa	inativa	inativa	-	inativa	inativa	-
Índice de vazios e		0,96	1,20	1,03	0,97	2,04	-	-
Permeabilidade k [cm/s]		$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	-	-

Obs: LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade; NL – não líquido; NP – não plástico.

Fonte: Sbroglia (2015).

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados (Tabela 7), os solos foram classificados segundo os métodos convencionais da *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO, do Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS e pelo Miniatura, Compactado, Tropical – MCT (Quadro 11).

Quadro 11 - Classificação dos solos das unidades geotécnicas.

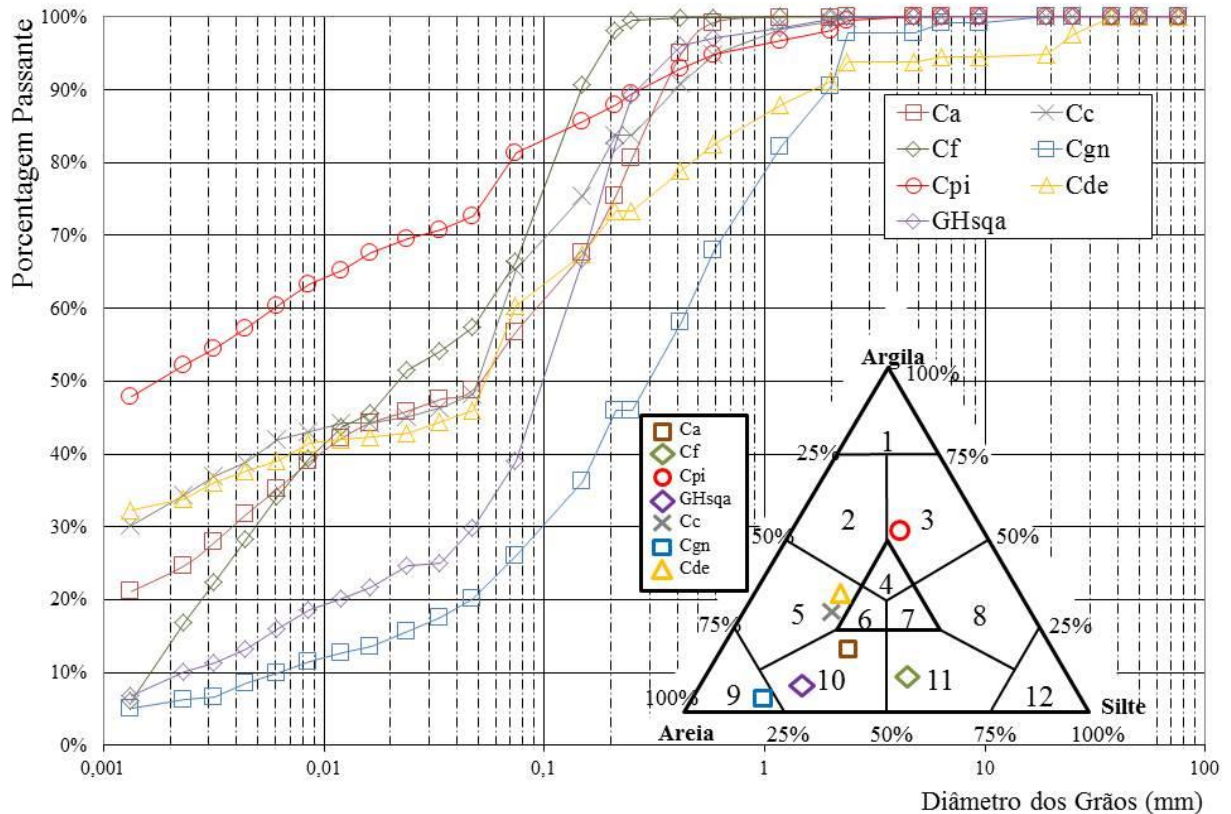
Unid. Geotéc.	Tipos de classificação			
	Granulométrica	AASHTO	SUCS	MCT
<i>Ca</i>	Areia siltica	Solo argiloso	Areia fina, siltosa ou argilosa com pequena plasticidade	Equivalência de areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas com siltes caulíníticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos
<i>Cc</i>	Areia argilosa	Areias argilosas	Areia argilosa	Argilas lateríticas
<i>Cf</i>	Silte arenoso	Solo siltoso	Areia fina siltosa com pequena plasticidade	Equivalência de siltes caulíníticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos com areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas
<i>Cgn</i>	Areia ou arenito	Areia fina	Areias siltosas (misturas mal graduadas de areia e silte)	Equivalência de areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos com siltes caulíníticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos
<i>Cpi</i>	Argila siltico-arenosa	Solo argiloso	Siltoso inorgânico com elevada plasticidade	Argilas lateríticas
<i>Cde</i>	Areia argilosa	Areias argilosas	Areia argilosa	Argilas lateríticas
<i>GHsqa</i>	Areia siltica	Areia fina	Areias siltosas (mistura mal graduada de areia e silte)	Areias siltosas com siltes quartzosos

Fonte: adaptado de Sbroglia (2015).

Conforme os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 7, a maioria dos solos apresenta maior quantidade de partículas finas (argila e silte), destacando-se os solos das unidades *Cpi* e *Cf*. As unidades *Cgn* e *GHsqa*, entretanto, possuem maior percentual de areia. Os resultados do ensaio de granulometria foram representados graficamente por curvas granulométricas, no qual o eixo das abscissas corresponde ao tamanho dos grãos, em escala logarítmica, e das ordenadas à porcentagem do material passante (Figura 36). Ainda, foi

realizada a classificação granulométrica dos solos utilizando o diagrama triangular de Shepard (1954), apresentada na Figura 36 (foram somadas as porcentagens de pedregulho e areia).

Figura 36 - Curvas granulométricas dos solos das unidades geotécnicas e diagrama triangular.



Fonte: adaptado de Sbroglia (2015).

Os valores de densidade relativa dos grãos dos solos variaram em torno de 2,70. Valores elevados correspondem a solos com grande quantidade de óxidos de ferro, como é o caso do solo da unidade Cpi que apresentou densidade de 3,02 (SBROGLIA, 2015).

Os resultados dos LL e LP demonstraram que os solos das unidades Ca e Cf caracterizam-se por ser de baixa plasticidade e os solos das unidades Cc, Cpi e Cde de alta plasticidade. Cabe destacar ainda que os solos das unidades Cgn e GHsqa foram classificados como não plásticos, isso se deve à baixa porcentagem de finos. Em relação à atividade da argila, todos os solos foram classificados como inativos (SBROGLIA, 2015).

No ensaio de MCT, os solos das unidades Ca, Cf, Cgn e GHsqa apresentaram um caráter expansivo, enquanto os solos das unidades Cc, Cpi e Cde foram classificados como não expansivos (SBROGLIA, 2015).

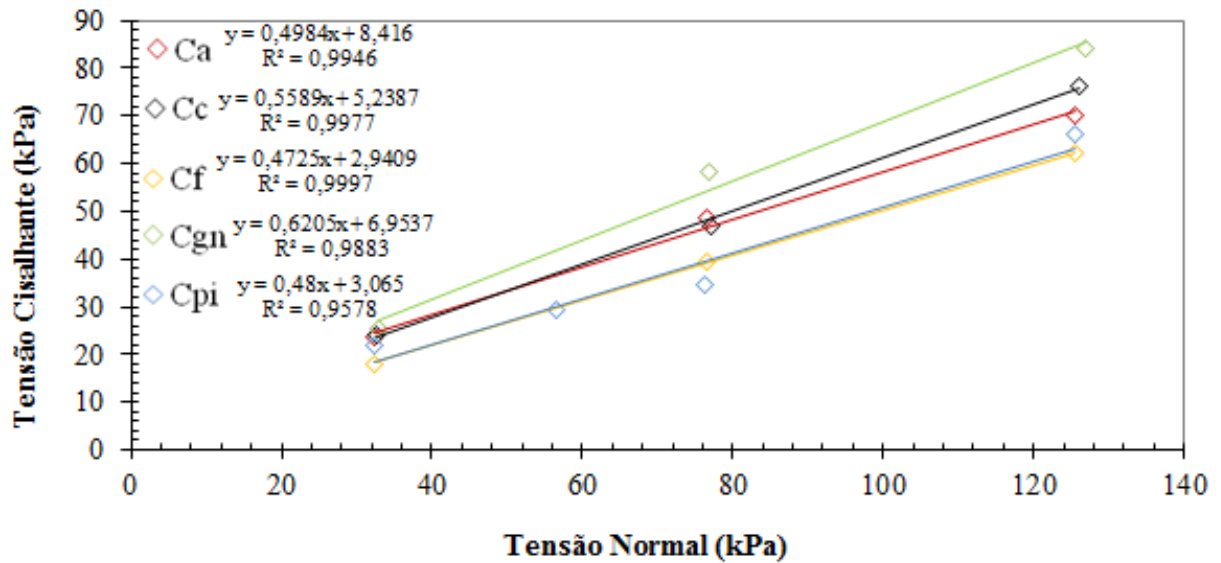
Nos solos residuais foi realizado o ensaio de compressão confinada na condição inundada para estimar a velocidade do escoamento da água pelos vazios do solo, expressa numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (k), o resultado variou entre $4,3 \cdot 10^{-4}$ e $1,2 \cdot 10^{-5}$ cm/s. O solo da unidade Cpi foi o que apresentou o segundo maior coeficiente de permeabilidade, de $1,8 \cdot 10^{-5}$ cm/s, logo, esse tipo de comportamento pode estar relacionado ao seu elevado índice de vazios e a sua granulometria. Apesar de ser um solo argiloso, o que poderia indicar baixa permeabilidade, há a possibilidade das partículas se apresentarem em grumos formando uma estrutura em macroporos, pelos quais a água escoava com maior facilidade (SBROGLIA, 2015).

Por meio do ensaio de Cisalhamento Direto, na condição inundada, elaborou-se o gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal (Figura 37), por intermédio das envoltórias de ruptura foram obtidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. Observou-se que os parâmetros apresentaram valores esperados para um perfil típico de solo residual em um horizonte C, com exceção do valor de intercepto de coesão do solo da unidade Cf, que se apresentou abaixo da média dos outros solos (Tabela 8). Apesar de possuir elevada quantidade de finos em sua composição, sobretudo silte, o valor mais baixo em relação aos outros solos pode estar relacionado ao caráter expansivo de solos originados do folhelho, conforme foi possível observar no ensaio de MCT. Em contrapartida, o maior valor de intercepto coesivo apresentado foi o da unidade Cpi (12,96 kPa), isso se deve à elevada porcentagem de argila presente no solo, que é mais de 50% (SBROGLIA, 2015).

Quanto ao ângulo de atrito, a variação dos valores está relacionada à distribuição granulométrica e à composição dos solos, ou seja, quanto maior a porcentagem de areia, maior o ângulo de atrito. Logo, o solo da unidade Cgn, que é composto por quase 70% de areia, apresentou o maior valor de ϕ , enquanto a unidade geotécnica Cpi, com cerca de 20% de areia, apresentou o menor valor de ângulo de atrito (SBROGLIA, 2015).

O peso específico natural e saturado dos solos, que representam a média dos valores referentes a cada estágio do ensaio de Cisalhamento Direto, não apresentaram variação significativa entre os solos. Destacou-se a unidade Cpi por apresentar valor abaixo em relação às outras unidades geotécnicas, além de apresentar um elevado índice de vazios (SBROGLIA, 2015).

Figura 37 - Gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal dos ensaios de Cisalhamento Direto na condição consolidada drenada.



Fonte: Sbroglia (2015).

Tabela 8 - Parâmetros de resistência obtidos no ensaio de Cisalhamento Direto.

Un. Geotécnica	Parâmetros de resistência ao cisalhamento			
	Intercepto de Coesão efetiva c' [kPa]	Ângulo de atrito efetivo φ' [graus]	Peso específico natural γ_{nat} [kN/m ³]	Peso específico saturado γ_{sat} [kN/m ³]
Ca	8,42	26,5	17,4	19,0
Cc	5,24	29,2	16,8	18,0
Cf	2,94	25,3	16,8	18,4
Cgn	6,95	31,8	17,3	19,5
Cpi	12,96	15,8	14,6	16,7

Fonte: adaptado de Sbroglia (2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa foi conforme indicado no diagrama da Figura 38, e pode ser dividido em cinco etapas. A primeira etapa consistiu nos levantamentos bibliográficos referentes ao tema e à área de estudo, no levantamento, aquisição e preparação das bases cartográficas, na geração de mapas temáticos e dos mapas de parâmetros morfológicos. Durante o levantamento bibliográfico foi elaborado um banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos nos municípios do Estado de Santa Catarina, o qual se encontra disponível na íntegra para consulta no Apêndice A. Ainda, nessa etapa foi realizada a revisão do inventário de cicatrizes de deslizamentos ocorridos em novembro de 2008 utilizando dados vetoriais e imagens de satélite, definido o tipo de deslizamento e, ainda, estimadas as superfícies de ruptura. Por fim, utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE) elaborados anterior e posteriormente ao desastre natural de 2008, com resolução espacial de 10 e 1m, respectivamente, foi realizada a análise dos parâmetros morfológicos das encostas nas superfícies de rupturas estimadas.

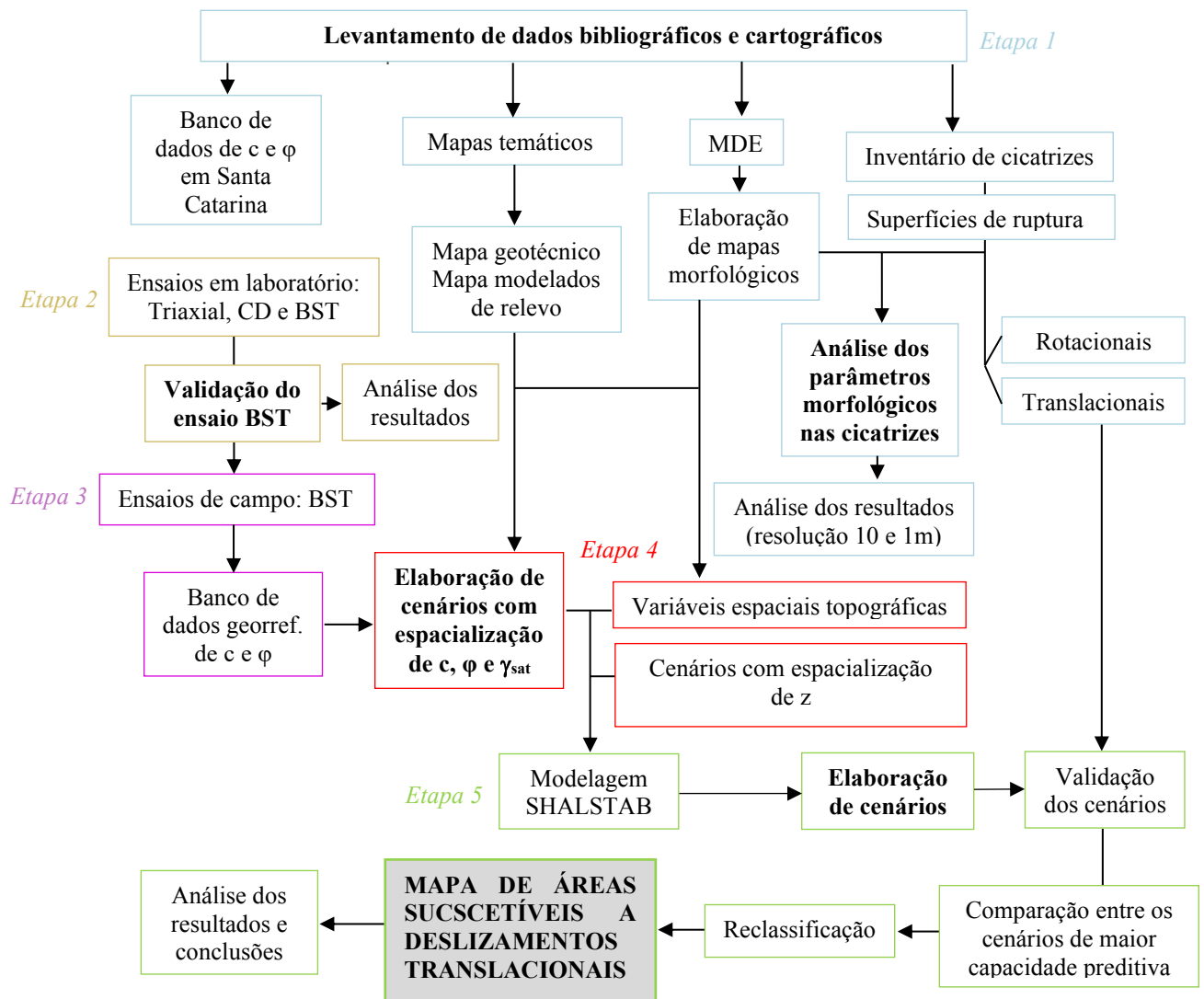
A segunda etapa trata do trabalho em laboratório cujo objetivo foi a validação do ensaio *Borehole Shear Test*. Dessa forma, foram fabricados corpos de prova com características geotécnicas idênticas e executados os ensaios *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial sob as mesmas condições. Por fim, foram comparadas as envoltórias de ruptura e os valores de intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ) obtidos nos três ensaios.

A terceira etapa consistiu nos trabalhos em campo por meio da execução de ensaios *Borehole Shear Test* distribuídos espacialmente pela bacia hidrográfica do Ribeirão Baú. Nessa etapa, foi elaborado um banco de dados georreferenciado de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da área em estudo.

A partir do referido banco de dados georreferenciado, foi realizado trabalho de gabinete utilizando um *software* de geoprocessamento, o qual consistiu na quarta etapa da pesquisa. Dessa forma, foi realizada a espacialização dos valores de resistência ao cisalhamento dos solos (c e ϕ) e do peso específico saturado (γ_{sat}). Essa espacialização foi realizada por meio de cenários utilizando mapas de atributos geológico-geotécnico, geomorfológicos e de geoestatística. Ainda, foram elaborados cenários a partir da espacialização do parâmetro profundidade de ruptura do solo (z).

A última etapa consistiu na elaboração de modelagens de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais por meio do modelo matemático SHALSTAB, para as resoluções espaciais de 1 e 10m, utilizando como dado de entrada os cenários de distribuição espacial dos parâmetros dos solos elaborados na etapa anterior. A validação das modelagens foi com base nas superfícies de rupturas estimadas na primeira etapa. Ainda, foi realizada a comparação entre os cenários que apresentaram melhor resultado na validação. E, por fim, obteve-se o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú por meio da classificação (semafórica) do cenário que apresentou maior capacidade preditiva.

Figura 38 - Diagrama de atividades da pesquisa.



Fonte: elaborado pela Autora.

4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO

Por meio do levantamento de trabalhos acadêmicos, artigos científicos e projetos desenvolvidos na área de geotecnia, foi elaborado um banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento com 608 resultados de ensaios em amostras de solos originadas de 37 substratos litológicos, distribuídos por 46 municípios localizados, em grande parte, na zona costeira de Santa Catarina. A elaboração do referido banco de dados, disponibilizado no Apêndice A, objetivou a análise da variação espacial dos parâmetros de resistência e, ainda, a disponibilização para consulta e para extração de dados de entrada geotécnicos a fim de utilização em modelagens matemáticas por outros pesquisadores.

Para os dados de caracterização geotécnica da área de estudo, foram utilizados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados nos anos de 2012 e 2013 por Sbroglia (2015) no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Com relação ao levantamento cartográfico, aquisição e geração dos mapas propostos na primeira etapa da pesquisa, compreenderam:

- Mapas temáticos de pedologia, geologia, geomorfologia, declividade, área de contribuição, disponibilizados no formato *.shp*, por Sbroglia (2015);
- Mapa geotécnico elaborado por meio da metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas de Dias (1995), disponibilizado no formato *.shp*, por Sbroglia (2015);
- Inventário de cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008, no formato *.dwg*, fornecido por Tomazzoli *et al.* (2012);
- Dados vetoriais, no formato *.shp*, da carta topográfica de Gaspar (folha SG-22-Z B-V-3), referentes aos cursos d'água, vias e curvas de nível com equidistância de 20m, na escala 1:50.000, produzidos no ano de 1981 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE e fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina - CIRAM;
- Modelo Digital de Elevação (MDE) do município de Ilhota, em escala 1:10.000 e resolução espacial de 1m, elaborado em 2012, disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina - SDE/SC;
- Imagem do sensor HRC (*High Resolution Camera*) do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres - CBERS, datada de abril de 2009, correspondente à faixa espectral do visível e parte do infravermelho próximo, com resolução espacial de 2,7m;
- Imagem do sensor AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2*) do *Advanced Land Observing Satellite* - ALOS, datada de agosto de 2009, correspondente à faixa espectral do visível e infravermelho, com resolução espacial de 10m.

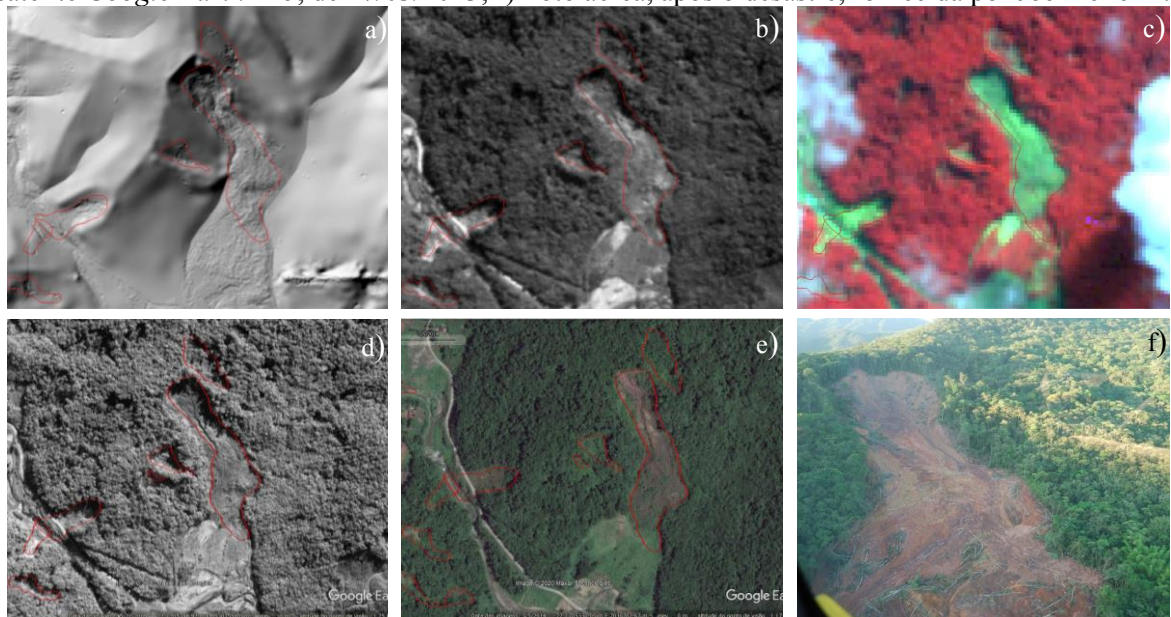
4.1.1 Inventário de cicatrizes

Foi realizada uma revisão do inventário de cicatrizes de deslizamentos ocorridos em novembro de 2008, com 526 cicatrizes, disponibilizado por Tomazzoli *et al.* (2012).

A revisão foi efetuada por meio de dados vetoriais; curvas de nível com equidistância de 1m; fotos aéreas captadas poucos meses após o desastre natural; imagens dos satélites CBERS e ALOS, datadas de 2009, com resolução espacial de 2,7 e 10m, respectivamente; imagens de satélite multidas disponibilizadas no *software Google Earth Pro*; e relevo sombreado elaborado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) produzido no Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina, em 2012, com resolução espacial de 1m. O uso do relevo sombreado elaborado com distintos ângulos de azimute foi considerado uma ferramenta importante na delimitação das cicatrizes, pois, em grande parte, os deslizamentos provocaram feições bem identificáveis no relevo.

A Figura 39 apresenta, representativamente, os produtos cartográficos utilizados na revisão do inventário de cicatrizes, na classificação estimada do tipo de deslizamento e na delimitação das possíveis superfícies de ruptura.

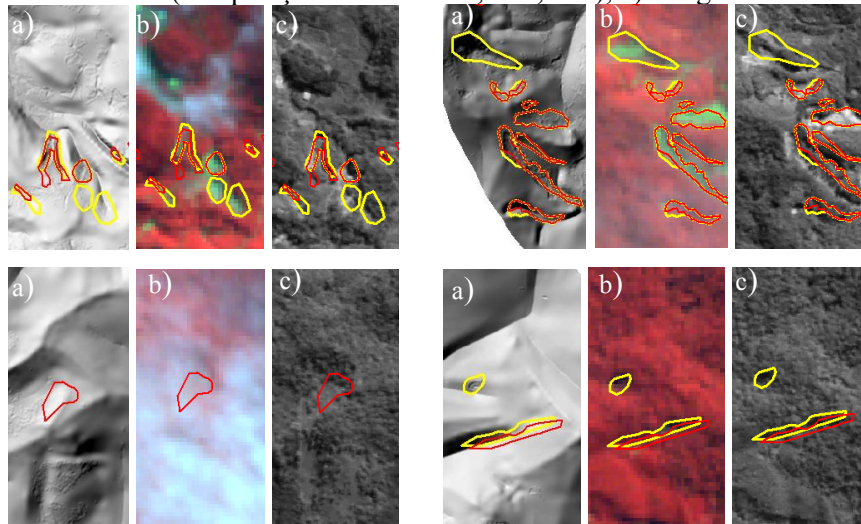
Figura 39 - Produtos cartográficos utilizados na revisão do inventário de cicatrizes: a) relevo sombreado (azimute 315° e altura 45°); b) Imagem sensor HRC do CBERS; c) Imagem sensor AVNIR-2 do ALOS (R4, G3, B1); d) Imagem de satélite disponível em *Google Earth Pro*, datada de 21/05/2009; e) Imagem de satélite *Google Earth Pro*, de 27/03/2013; f) Foto aérea, após o desastre, fornecida por Joel Pellerin.



Fonte: elaborado pela Autora.

As cicatrizes foram delimitadas por polígonos de acordo com a sua geometria. Ao total, foram mapeadas 521 cicatrizes de deslizamentos por meio das seguintes adequações no inventário de Tomazzoli *et al.* (2012): a) ajuste da localização do polígono da cicatriz de deslizamento, b) localização de nova cicatriz de deslizamento e c) supressão de polígono no qual não foi observado indício do movimento de massa (utilizando as bases cartográficas indicadas na Figura 39), exemplos dos ajustes realizados são apresentados na Figura 40.

Figura 40 - Imagens ilustrativas das divergências entre os polígonos das cicatrizes de deslizamentos mapeadas por Tomazzoli *et al.* (2012) - em vermelho - e a revisão do inventário de cicatrizes - em amarelo (escala 1:8.000), sobrepostas a: a) relevo sombreado (azimute 315° e altura 45°); b) Imagem sensor AVNIR-2 do ALOS (composição de cores R-4, G-3, B-1); c) Imagem sensor HRC do CBERS.



Fonte: elaborado pela Autora.

A classificação quanto à forma do plano de ruptura estimado para cada cicatriz de deslizamento ocorrido em novembro de 2008 foi dividida em translacional e rotacional. Para essa classificação, considerou-se a forma e alcance do deslizamento, material mobilizado, declividade e localização na encosta. De modo geral, as cicatrizes de deslizamentos translacionais se apresentaram mais estreitas e alongadas, ocorrendo próximas ao divisor de água, ou seja, no terço médio e superior das encostas. As cicatrizes dos deslizamentos rotacionais, por sua vez, apresentaram-se mais largas e profundas, localizadas, principalmente, próximas à base das encostas.

Por fim, as superfícies de ruptura das cicatrizes estimadas foram vetorizadas em forma de polígonos, totalizando 535 superfícies, sendo mapeadas 526 em deslizamentos translacionais e 9 em rotacionais, utilizando os produtos cartográficos apresentados na Figura 39, além das

curvas de nível, visualização do relevo em 3D por meio do *software Google Earth Pro* e nas saídas de campo. Destaca-se que em 14 cicatrizes de deslizamentos foram mapeadas mais de uma superfície de ruptura.

4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS NAS CICATRIZES DOS DESLIZAMENTOS

Para analisar a relação entre os parâmetros morfológicos e a ocorrência de deslizamentos, nas escalas 1:50.000 e 1:10.000, realizou-se a determinação de índices de Frequência (F), da Concentração de Cicatrizes (CC) e de Potencial de Deslizamento (PD), conforme metodologia desenvolvida por Gao (1993).

Primeiro, para cada parâmetro morfológico analisado - altitude, declividade, orientação, aspecto ou forma das encostas e área de contribuição - foram elaborados mapas em formato matricial nas resoluções espaciais de 10 e 1m, a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de data anterior e posterior ao desastre de 2008, respectivamente. Aquele foi elaborado a partir dos dados vetoriais disponibilizados pelo IBGE e este foi disponibilizado pela SDE/SC.

O Quadro 12 indica as ferramentas utilizadas para elaboração dos mapas de parâmetros morfológicos por meio do *software* de geoprocessamento *ArcGis*.

Quadro 12 - Ferramentas do *software* de geoprocessamento utilizadas para elaboração dos mapas morfológicos.

Ferramentas utilizadas		Mapas morfológicos
<i>3D Analyst Tools</i>	<i>Raster Reclass</i>	Altitude
	<i>Interpolation</i>	MDE
<i>Spatial Analyst Tools</i>		Declividade
	<i>Surface</i>	Orientação
		Forma
	<i>Hydrology</i>	Área de Contribuição

Fonte: elaborado pela Autora.

Os mapas de parâmetros morfológicos elaborados foram classificados em determinado número de classes, as quais melhor representassem sua distribuição, conforme se apresenta na Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação dos mapas morfológicos.

Classes dos mapas morfológicos									
Altitude [metros]									
0-50	100-150	200-250	300-350	400-450	500-550	600-650	700-750	800-850	
50-100	150-200	250-300	350-400	450-500	550-600	650-700	750-800		
Declividade [graus]									
0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	>45
Orientação das encostas									
Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste	Norte	
<i>valores em graus</i>									
0-22,5	22,5-67,5	67,5-112,5	112,5-157,5	157,5-202,5	202,5-247,5	247,5-292,5	292,5-337,5	337,5-360,0	
Forma das encostas									
Côncava			Retilínea			Convexa			
<i>valores em graus</i>									
(10m) -20 – -0,1			-0,1 – 0,1			0,1 – 10,3			
(1m) -194 – -0,1			-0,1 – 0,1			0,1 – 207			
Área de Contribuição [nº. de células]									
0-10 ¹		10 ¹ -10 ²		10 ² -10 ³		10 ³ -10 ⁴		10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁵ -10 ⁶

Fonte: elaborado pela Autora.

Os índices de Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamento (PD) foram calculados conforme Gao (1993). A Frequência (F) em cada mapa de parâmetro morfológico foi calculada a partir da razão entre o total de células (*pixels*) de cada classe e o total de células da bacia, definindo a frequência de distribuição das classes na área de estudo (Equação 16).

$$F = \frac{n^{\circ} \text{ células de cada classe}}{n^{\circ} \text{ células da bacia}} .100 \quad (16)$$

Posteriormente, foram realizadas duas outras análises, utilizando os mapas de parâmetros morfológicos e as superfícies de ruptura das cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008. As superfícies de ruptura em formato vetorial foram sobrepostas aos mapas morfológicos matriciais e, utilizando a ferramenta *Spatial Analyst Tools/Extraction/Extract by Mask*, foi contabilizado o número de células (*pixels*) de cada classe no interior da superfície de ruptura dos deslizamentos, ou seja, as células deslizadas. O índice Concentração de Cicatrizes foi calculado a partir da relação entre o número de células deslizadas em cada classe e o número total de células deslizadas na bacia hidrográfica (Equação 17), definindo-se, dessa forma, as classes mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos em cada mapa morfológico.

$$CC = \frac{n^{\circ} \text{ células deslizadas em cada classe}}{n^{\circ} \text{ células deslizadas na bacia}} .100 \quad (17)$$

Por fim, outra relação obtida foi a razão entre o número de células presentes no interior das superfícies de ruptura em cada classe, chamadas de células deslizadas, e o total de células daquela classe (Equação 18), ou seja, a frequência de células afetadas dentro de cada classe estudada, esse índice é chamado de Potencial de Deslizamento (PD) por Gao (1993).

$$PD = \frac{n^{\circ} \text{ células deslizadas em cada classe}}{n^{\circ} \text{ células de cada classe}} .100 \quad (18)$$

Logo, o PD é calculado para analisar a distribuição das superfícies de ruptura em cada classe considerando a representatividade de cada uma no total da área da bacia. Portanto, diferentemente dos valores de F e CC, que podem alcançar 100%, uma vez que tais índices são referentes, respectivamente, ao total de células da bacia e ao total de cicatrizes mapeadas, para calcular o PD são consideradas apenas as células afetadas dentro de cada classe, apresentando valores consideravelmente menores que os demais índices.

4.3 VALIDAÇÃO DO ENSAIO *BOREHOLE SHEAR TEST* EM LABORATÓRIO

A validação do ensaio *Borehole Shear Test* (BST) para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos foi por meio da comparação com os resultados dos ensaios de laboratório, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial. Os três ensaios foram executados na condição consolidada e drenada, no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

4.3.1 Corpos de prova

A fim de produzir corpos de prova com as mesmas características geotécnicas, foi utilizada uma mistura compactada de areia fina, cal e água. A escolha da areia para a execução dos ensaios deveu-se a: a) suas características geotécnicas serem dependentes do entrosamento ou embricamento entre os grãos, dessa forma, quando conhecido o peso específico aparente seco (γ_d) é possível fabricar corpos de prova idênticos; b) repetição de ensaio em corpos de prova com as mesmas características, dada sua homogeneidade; e c) o solo arenoso é o que melhor representa a condição consolidada e drenada, na qual foram realizados os ensaios.

Inicialmente, foram testadas amostras com diferentes proporções de material, conforme se pode observar na Figura 41, e, após testes tátil-visuais, foi determinado o traço padrão em peso na proporção de 10 de areia fina por 1,5 de cal por 1,5 de água. A reação pozolânica proporcionada pelo contato do mineral com a cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, gerou coesão para a mistura e possibilitou a execução do furo para o ensaio *Borehole Shear Test*. Todas as amostras foram misturadas manualmente até se alcançar a homogeneidade da mistura.

Figura 41 - Teste tátil-visual em amostras com diferentes proporções de areia fina, cal e água.



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

A preparação das amostras para os ensaios foi conduzida pela norma ABNT NBR 6457/2016 (Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização). Primeiramente, foi realizada a compactação da mistura areia fina, cal e água conforme a norma ABNT NBR 7182/2016 (Solo - Ensaio de compactação). Dessa forma, por meio das curvas de compactação, foi determinada a umidade ótima para a confecção dos corpos de prova a fim de execução dos ensaios.

A caracterização geotécnica dos corpos de prova foi realizada por meio da execução dos ensaios de Análise Granulométrica (conforme ABNT NBR 7181/2016 Solo - Análise Granulométrica) e de Massa Específica (conforme ABNT NBR 6458/2016 - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água).

Para que se pudesse realizar comparação precisa entre os resultados dos ensaios *Borehole Shear Test* (BST), Cisalhamento Direto (CD) e Compressão Triaxial, foi mantido o mesmo valor de peso específico aparente seco (γ_d) para todos os corpos de prova. O γ_d padrão foi calculado por meio da relação entre o peso da mistura de areia com a cal e o volume total, mensurado a partir do molde quadrado de Cisalhamento Direto com dimensões de 10,16cm por 2,00cm de altura (volume de 206,45cm³). O molde de Cisalhamento Direto foi preenchido pela

mistura seca de areia e cal por meio de vibração e aplicação de pressão.

Com a obtenção do γ_d padrão, de $14,94\text{kN/m}^3$, foi possível confeccionar corpos de prova semelhantes, ajustando-se a mesma quantidade de solo (areia, cal e água) em volume do molde por meio da compactação de camadas. O corpo de prova utilizado no ensaio BST foi moldado no interior de um tubo PVC (com diâmetro interno de $19,2\text{cm}$), conforme Figura 42a, para a compactação foi utilizada uma chapa de madeira (com diâmetro de $19,1\text{cm}$). A compactação das camadas para o ensaio BST foi realizada visando alcançar determinada altura. A altura de cada camada foi calculada conforme o γ_d padrão preestabelecido.

Para a confecção dos corpos de prova dos ensaios de Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial, o solo foi disposto nos moldes em camadas, compactadas até a densidade desejada. O controle da compactação foi realizado com o auxílio de um gabarito. Desse modo, foi possível distribuir toda a mistura no interior do molde cilíndrico de dimensões de $7,62\text{cm}$ de altura por $3,81\text{cm}$ de diâmetro para o ensaio de Compressão Triaxial (Figura 42b) e quadrado de dimensões de $10,16\text{cm}$ de comprimento por $10,16\text{cm}$ de largura e $2,00\text{cm}$ de altura para o ensaio de Cisalhamento Direto (Figura 42c).

Ainda, para a confecção dos corpos de prova do ensaio de Compressão Triaxial, foi empregado um molde tri partido revestido internamente por uma membrana de látex, fixada na base da câmara de Compressão Triaxial por 4 *O-rings*, conforme é possível observar na Figura 42b.

Figura 42 - Corpos de prova utilizados nos ensaios: a) BST; b) Compressão Triaxial; e c) CD.





Fonte: a) e c) Domingues *et al.* (2019); b) Autora.

4.3.2 Borehole Shear Test

O ensaio *Borehole Shear Test* foi realizado com o equipamento modelo A103, em conformidade com o procedimento de *Handy Geotechnical Instruments*, e executado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC no ano de 2019.

Inicialmente, foi realizada a perfuração do solo por meio de um trado pedológico com 65mm de diâmetro. A profundidade do furo para o posicionamento da sonda de cisalhamento foi de aproximadamente 20cm.

Após a montagem do equipamento (Figura 43), aplicou-se as tensões de consolidação de 20, 40, 60 e 80kPa com o auxílio de um manômetro com bomba manual. O tempo de consolidação do corpo de prova foi de 15 minutos para a aplicação do primeiro valor de tensão normal e 5 minutos para cada um dos outros valores de tensão normal posteriormente aplicados.

A resistência ao cisalhamento do solo foi medida por meio do arrancamento da sonda de cisalhamento a uma velocidade controlada de duas rotações da manivela por segundo, a qual representou uma velocidade linear de 0,360mm/minuto.

Figura 43 - Execução do ensaio BST em laboratório.



Fonte: Autora.

4.3.3 Cisalhamento Direto

O ensaio de Cisalhamento Direto foi realizado em 2019, no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, conforme a *American Society for Testing and Materials (ASTM) D3080/2004 (Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions)*.

Os corpos de prova foram posicionados na caixa bipartida da prensa de cisalhamento composta por duas seções (superior e inferior), após, foram colocadas pedras porosas, no topo e na base, a fim de permitir a drenagem do solo (Figura 44), dessa forma, os corpos de prova foram rompidos na condição parcialmente saturada.

A consolidação dos corpos de prova se deu por meio da aplicação das tensões normais de 20, 40, 60 e 80kPa, admitindo-se como o momento da estabilização do rearranjo das partículas em função das tensões aplicadas o instante em que se cessaram as variações na deformação vertical, dessa forma, por ser um material arenoso aguardou-se no mínimo 1 hora para a execução do cisalhamento.

A etapa de cisalhamento ocorreu após a consolidação e teve por objetivo verificar a maior tensão de cisalhamento que o solo suporta por meio da imposição de uma superfície de ruptura. O cisalhamento dos corpos de prova ocorreu por meio da movimentação da caixa inferior da prensa de Cisalhamento Direto a uma velocidade padrão de 0,307mm/minuto.

Figura 44 - Execução do ensaio de Cisalhamento Direto.



Fonte: Autora.

4.3.4 Compressão Triaxial

O ensaio de Compressão Triaxial foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC em 2019, em conformidade com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D7181/2011 (*Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*).

O equipamento de Compressão Triaxial, modelo *Norwegian Geotechnical Institute*, é composto por uma câmara triaxial para ensaio de corpos de prova cilíndricos, a tensão confinante (σ_c) e a contratensão são aplicadas por sistema hidráulico, a partir de duas colunas de mercúrio cuja altura é controlada por servomotores. Esses são acionados e controlados de forma automática por um computador, que também faz a aquisição de dados.

Para garantir a drenagem, uma vez que o ensaio foi conduzido na condição consolidada drenada, foram colocadas duas pedras porosas, uma no topo e outra na base do corpo de prova (Figura 45a). Após a montagem do equipamento, iniciou-se a execução do ensaio, adotando-se os procedimentos descritos a seguir.

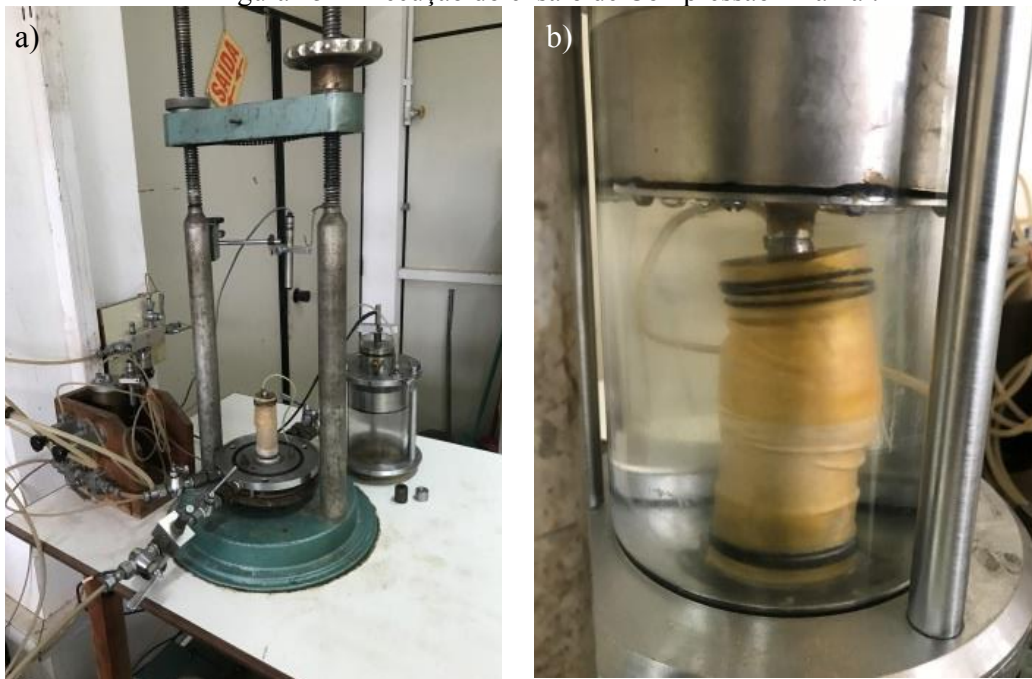
Primeiramente, realizou-se a saturação do corpo de prova. Para que não ocorresse a liquefação do solo durante a fase de saturação, inicialmente, foi aplicada uma tensão confinante (σ_c) de 10kPa. Na sequência, a partir da percolação de água de forma ascendente (dada pela

diferença de pressão de 10kPa entre o topo e a base), os poros presentes no solo ocupados por ar foram preenchidos por água.

Após a saturação, foi realizada a etapa de consolidação do corpo de prova por meio do preenchimento da câmara com água e, assim, a aplicação da tensão confinante (σ_c), correspondente, para cada estágio, aos valores de 20, 40 e 80kPa. Aguardou-se o tempo necessário para a consolidação do solo, dado pela estabilização da variação volumétrica.

Posteriormente a etapa de consolidação, iniciou-se o cisalhamento por meio da aplicação da tensão desviadora (σ_d), a uma velocidade de 0,022mm/minuto, até a ruptura do corpo de prova (Figura 45b). Durante a fase de cisalhamento foram realizadas leituras contínuas a cada 5 segundos, por um período de aproximadamente 3 horas. Foram monitorados os valores de tensão de confinamento ($\sigma_c = \sigma_3$), tensão desviadora (σ_d), variação volumétrica (Δ_v) e a variação de altura do corpo de prova (Δ_h). Adotou-se como critério de ruptura a estabilização da deformação volumétrica do corpo de prova.

Figura 45 - Execução do ensaio de Compressão Triaxial.



Fonte: Autora.

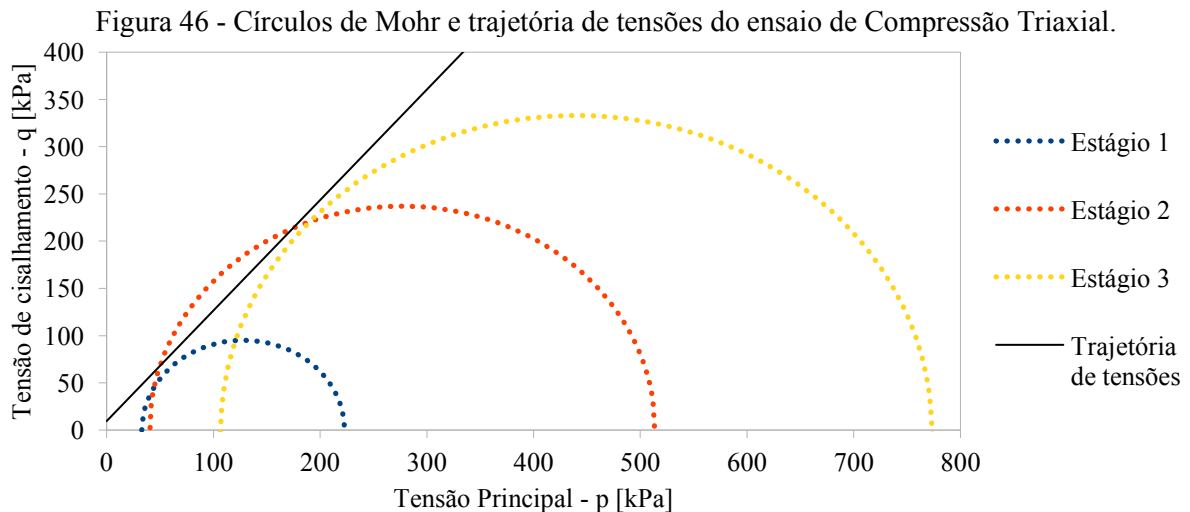
Nesse ensaio, a tensão intermediária (σ_2) é igual a tensão principal menor (σ_3) e a tensão desviadora (σ_d , denominada q) foi calculada, em kPa, por meio da Equação 19. Onde, σ_1 é a tensão principal maior, em kPa, e σ_3 é a tensão principal menor, em kPa.

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (19)$$

A partir da Equação 20 foi calculada a tensão média normal (p), em kPa.

$$p = \frac{(\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3)}{3} \quad (20)$$

Por fim, por meio dos dados obtidos foi possível elaborar o gráfico de tensão de cisalhamento (q) - valor do raio do círculo de Mohr, na ordenada, *versus* tensão principal (p) - valor do centro do círculo de Mohr, no eixo das abscissas, a partir do qual foi determinada a trajetória de tensões (Figura 46). Com base na trajetória de tensões definiu-se a envoltória de ruptura do corpo de prova pelo critério de Mohr-Coulomb, por meio da qual se obteve os parâmetros de resistência ao cisalhamento.



Fonte: elaborado pela Autora.

4.3.2 Comparação entre os resultados dos ensaios

A partir dos resultados obtidos nos ensaios *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial para corpos de prova de iguais características e submetidos aos mesmos valores de tensões normais, foi obtido um conjunto de pares de valores ($\tau_{\text{máx}}$, σ) para cada estágio que, plotados em um gráfico de tensão cisalhante máxima *versus* tensão normal, foi possível construir a envoltória de ruptura do corpo de prova.

A partir dessa, foram determinados os parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito. A comparação entre os resultados dos ensaios foi realizada a partir da análise das envoltórias de ruptura ao cisalhamento pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb e dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos.

4.4 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM CAMPO

Para a caracterização da resistência ao cisalhamento dos solos na área de estudo, foram realizados ensaios de campo com a utilização do equipamento *Borehole Shear Test* (BST), modelo A103. O procedimento de execução do ensaio foi conforme as instruções do fabricante, de *Handy Geotechnical Instruments*. Foram realizadas três saídas a campo, a primeira ocorreu no ano de 2017, na qual foram executados ensaios em colaboração com o trabalho de conclusão de curso de Degering (2018), a segunda no ano de 2020 e, por fim, a terceira no ano de 2021.

Foram executados ensaios BST distribuídos espacialmente pela área de estudo, abrangendo todas as unidades geotécnicas (exceto as unidades de solo litólico – área íngreme, e de sedimentos quaternários – área plana) e levando-se em consideração os modelados de relevo (montanhoso, colinoso e rampas de colúvio). Pretendeu-se realizar uma distribuição uniforme pela bacia hidrográfica, uma vez que seria realizada a interpolação dos dados, contudo, algumas áreas não foram possíveis de serem acessadas devido às restrições físicas (topográfica) ou por serem propriedades privadas.

Os ensaios foram realizados no horizonte C dos solos, para isso, foram executadas tradagens com a utilização de um trado pedológico manual de 65mm de diâmetro nas profundidades entre 0,40 e 0,90m (Figura 47a). Antes da execução do ensaio, o furo foi inundado, a fim de eliminar a parcela de sucção presente no solo, e aguardou-se cerca de 15 minutos (Figura 47b).

Figura 47 - Realização do furo com trado pedológico (a) e inundação para a realização do ensaio (b).



Fonte: Autora.

Com o terreno previamente limpo e aplainado, introduziu-se e posicionou-se a sonda cisalhante no interior do furo inundado em profundidade predeterminada (Figura 48a), no horizonte C do solo. Com o equipamento instalado, aplicou-se a tensão normal acionando a bomba manual até a pressão desejada, indicada no leitor (Figura 48b). As tensões normais aplicadas variaram de 25 a 95kPa.

Com a aplicação da pressão, a sonda se expande e a carga aplicada nos pratos é transferida para o solo. Por essa razão, necessitou-se aguardar um intervalo de tempo para que ocorresse a consolidação do material quanto à pressão exercida. O tempo de consolidação nos ensaios variou de 10 minutos para os solos arenosos e 15 minutos para os solos argilosos.

Após o tempo de consolidação, rotacionou-se a manivela em velocidade constante de duas rotações por segundo, dessa forma, o manômetro registrou aumento gradual da tensão cisalhante. A tensão de cisalhamento máxima registrada indicou ruptura por cisalhamento. Esse valor foi aferido quando ocorreu a queda repentina da tensão no manômetro ou quando a tensão se estabilizou após 25 rotações.

Figura 48 - Motagem do equipamento (a) e execução do ensaio BST na área de estudo (b).

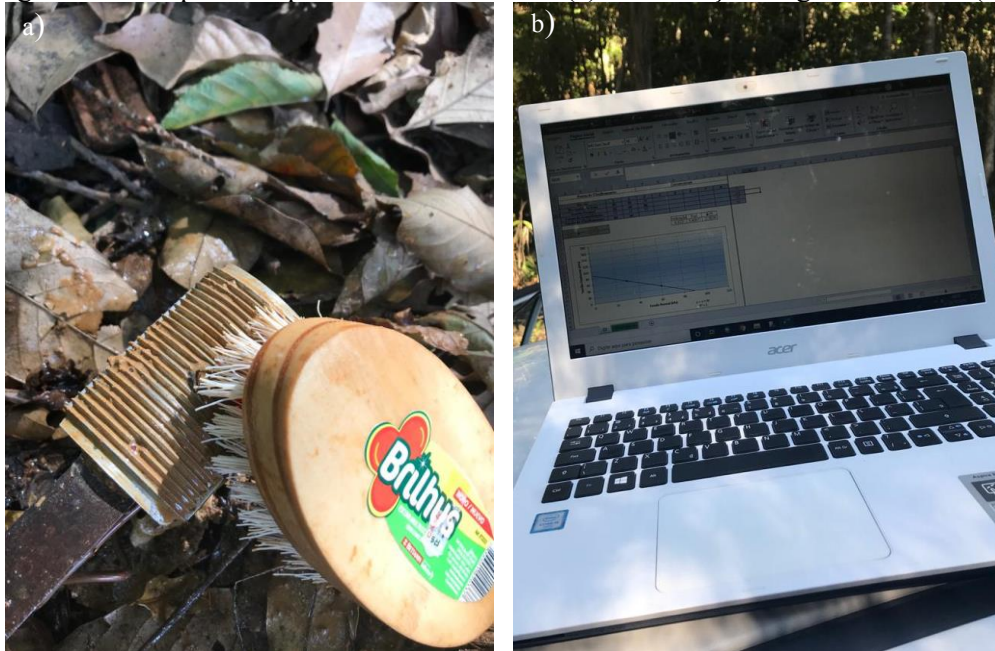


Fonte: Autora.

Após realizada a determinação da tensão cisalhante máxima, a pressão era liberada para que as placas de cisalhamento fossem retiradas do furo e limpas (Figura 49a), a fim de garantir melhor aderência ao solo no próximo estágio. Realizou-se esse procedimento para três a quatro estágios de tensão normal. Para a execução dos outros estágios inseriu-se a sonda em uma posição diferente da profundidade no estágio anterior ou, ainda, manteve-se a mesma posição, porém, rotacionou-se a sonda em 90 graus, a fim de realizar o ensaio numa parede do furo não comprometida.

A partir dos dados obtidos nos estágios do ensaio, elaborou-se um gráfico de tensão cisalhante máxima *versus* tensão normal ($\tau_{\text{máx}} \times \sigma$), e obtiveram-se os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, intercepto coesivo e ângulo de atrito por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Foi levado o *notebook* ao campo e elaborado o referido gráfico em tempo real (Figura 49b), dessa forma, foi possível analisar a necessidade de realização de mais estágios a partir da aplicação de um novo valor de tensão normal.

Figura 49 - Limpeza das placas de cisalhamento (a) e elaboração do gráfico $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ (b).



Fonte: Autora.

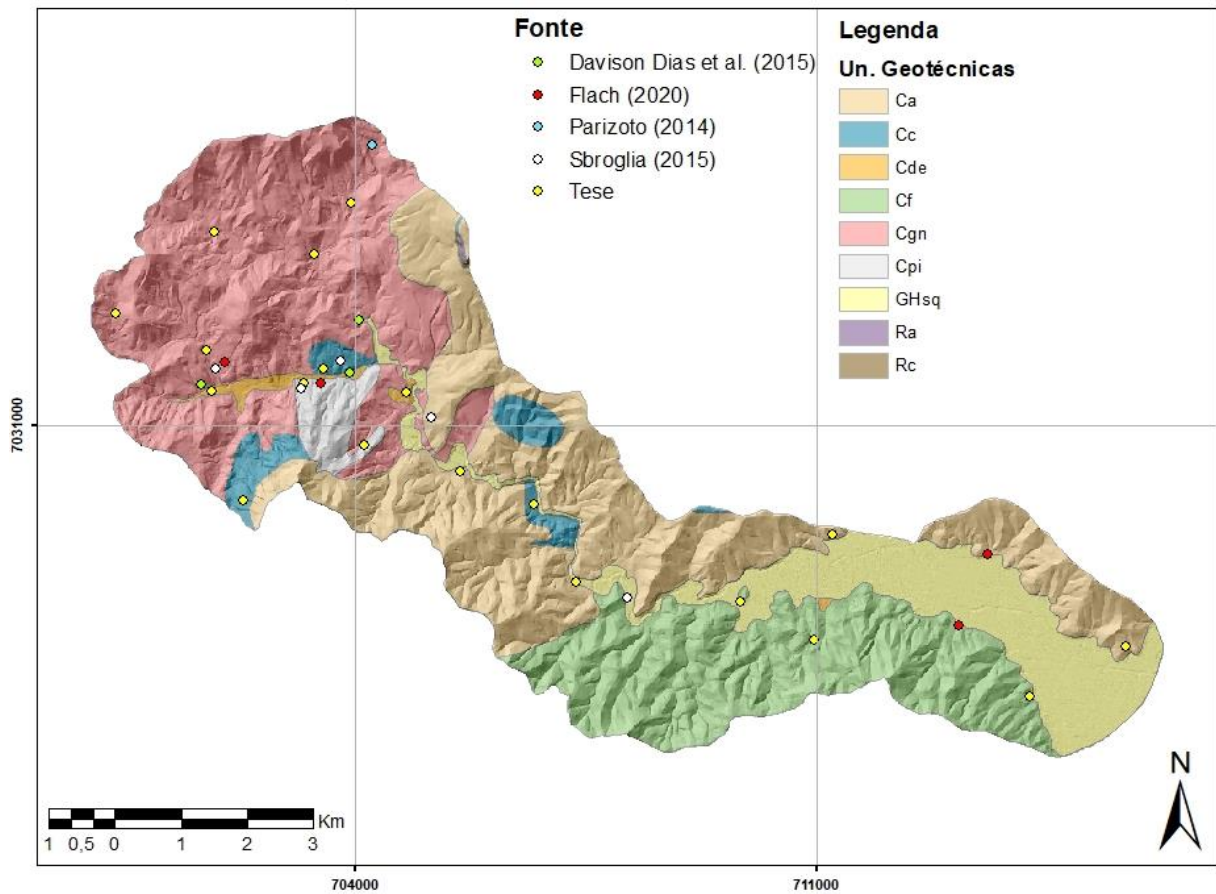
4.5 ESPACIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Primeiramente, foi elaborado um banco de dados georreferenciado dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú. A partir dele, foram gerados cenários com a distribuição espacial dos valores de resistência ao cisalhamento dos solos, intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ), e peso específico (γ) por meio de mapas com atributos geotécnico, geológico, geomorfológico e de geoestatística. Por fim, utilizando os cenários elaborados realizou-se uma análise da variabilidade dos valores dos parâmetros dos solos na área de estudo.

4.5.1 Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú

Para a composição do banco de dados georreferenciado dos parâmetros c , ϕ e γ , além dos dados obtidos dos ensaios BST executados, foram utilizados dados de outros trabalhos acadêmicos (PARIZOTO, 2014; SBROGLIA, 2015; FLACH, 2020) e de projeto na área de geotecnia (DIAS; PARIZOTO; ESPÍNDOLA, 2015). A localização dos dados, conforme fonte, está indicada na Figura 50.

Figura 50 - Mapa geotécnico com a localização dos ensaios ou da coleta do corpo de prova para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.



Fonte: elaborado pela Autora.

4.5.2 Espacialização por atributos geotécnico, geológico e geomorfológico

A partir do banco de dados georreferenciado de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú elaborado, foram espacializados os parâmetros c e ϕ por diferentes cenários: utilizando o mapa geotécnico (atributos geológico-geotécnico) e utilizando os mapas de modelados de relevo, altitude, declividade, orientação e forma das encostas (atributos geomorfológicos). Para cada classe desses mapas, foi calculada a média entre os parâmetros de resistência do banco de dados localizados no interior da classe.

Ainda, para a distribuição com base no mapa geotécnico, também foi elaborado um cenário utilizando os dados da literatura para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu constantes no banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento para a zona costeira de Santa Catarina (Apêndice A).

4.5.3 Espacialização por geoestatística

A partir da malha aleatória de pontos georreferenciados obtida do banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, em ambiente SIG, foi realizada a interpolação dos dados por meio de uma ferramenta de geoestatística denominada krigagem (Quadro 13).

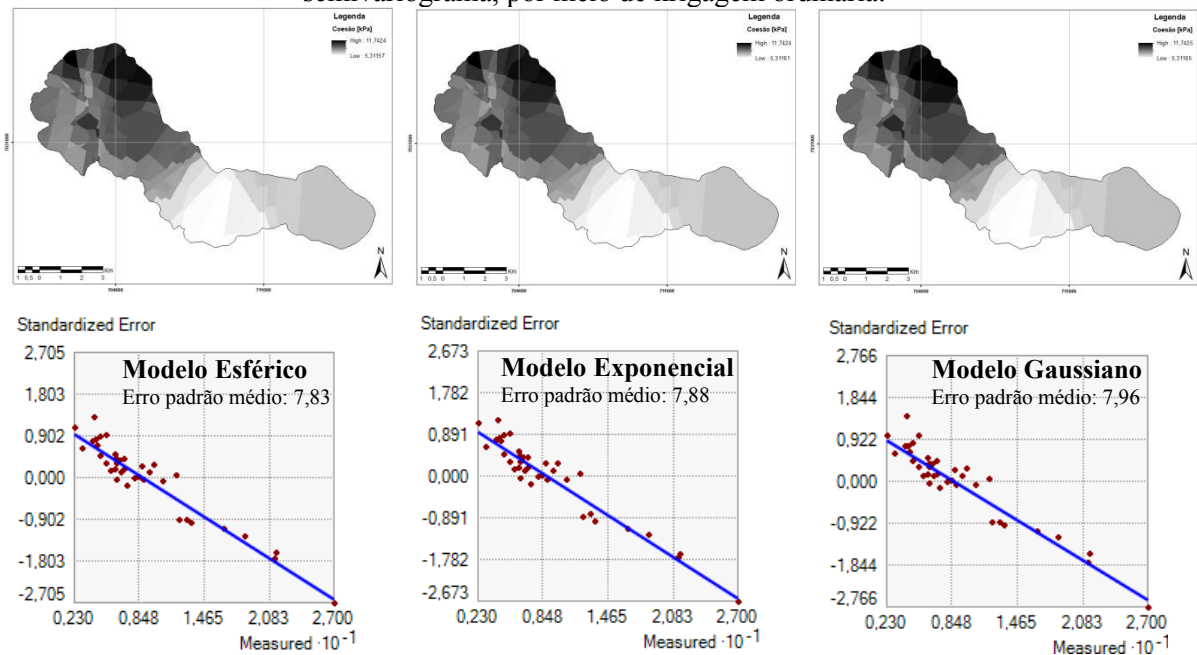
Quadro 13 - Ferramenta do *software* de geoprocessamento utilizada para interpolação dos dados.

Ferramenta utilizada	Tipo de interpolação
<i>Spatial Analyst Tools</i> <i>Interpolation</i> <i>Kriging</i>	Krigagem

Fonte: elaborado pela Autora.

A espacialização dos dados foi por meio do interpolador krigagem do tipo ordinária, ainda, foi utilizado o modelo esférico, pois foi o que apresentou melhor ajuste ao semivariograma e menor erro padrão médio dentre os modelos testados (Figura 51).

Figura 51 - Espacialização dos dados de intercepto coesivo a partir de três modelos de semivariograma, por meio de krigagem ordinária.



Fonte: elaborado pela Autora.

4.6 MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS

Para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais, foi utilizado o modelo matemático SHALSTAB. Os dados de entrada referem-se às variáveis espaciais topográficas declividade (θ) e área de contribuição por comprimento de contorno unitário (a/b). As variáveis referentes aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) foram determinadas em campo, por meio de ensaios BST, e adquiridas do banco de dados georreferenciado. Quanto à espessura de ruptura do solo (z), foram utilizados valores fixos e especializados por meio de equações matemáticas.

4.6.1 Obtenção dos parâmetros topográficos

As variáveis topográficas utilizadas na modelagem, declividade (θ), em graus, e área de contribuição (a), em m^2 , foram obtidas em formato matricial (*raster*) a partir do MDE hidrologicamente consistido com resolução espacial de 1 e 10 metros (Quadro 14). Observa-se que, para construir o mapa de direções de fluxo, necessário para a confecção do mapa de área de contribuição, foi utilizada a extensão *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM), a qual considera direções de fluxo infinitas, definidas de acordo com a diferença de altimetria entre o *pixel* central e os adjacentes. O comprimento de contorno (b) corresponde ao tamanho do *pixel* do MDE.

O MDE hidrologicamente consistido foi elaborado a partir da remoção das falsas depressões (*sinks*) do MDE, representadas por células (*pixels*) com elevação menor do que as células circundantes, as quais descaracterizam o direcionamento do escoamento. Sua eliminação se deu por meio do pareamento com a célula (*pixel*) vizinha de menor elevação (Quadro 14).

Quadro 14 - Ferramentas do *software* de geoprocessamento utilizadas para obtenção dos parâmetros topográficos.

Ferramentas utilizadas		Parâmetros topográficos
Spatial Analyst Tools	<i>Surface</i>	Declividade
	<i>Hydrology</i>	MDE hidrologicamente consistido
	<i>TauDEM</i>	Área de Contribuição
	<i>Slope</i>	Direções de fluxo
	<i>Fill</i>	
	<i>Flow Accumulation</i>	
	<i>Flow Direction</i>	

Fonte: elaborado pela Autora.

4.6.2 Obtenção dos parâmetros geotécnicos

Para as variáveis referentes aos parâmetros dos solos (intercepto de coesão - c , ângulo de atrito - ϕ e peso específico saturado do solo - γ_{sat}), foram elaborados cenários distintos a partir dos valores disponíveis no banco de dados georreferenciado elaborado para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú. No total, foram gerados 15 cenários, 6 sem e 9 com espacialização dos parâmetros geotécnicos, conforme descritos no Quadro 15.

Quadro 15 - Cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos.

SEM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS		
A	Média Literatura	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu</u>
B	Média	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u>
C	Média Ponderada (geotecnia)	<u>média ponderada</u> calculada por meio da área dos <u>polígonos das unidades geotécnicas</u> , para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u>
D	Média Ponderada (modelados relevo)	<u>média ponderada</u> calculada por meio da área dos <u>polígonos dos modelados de relevo</u> , para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u>
E	Menos Conservador	atribuídos os <u>maiores valores de c e ϕ</u> e o <u>menor valor de γ_{sat}</u> do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u>
F	Mais Conservador	atribuídos os <u>menores valores de c e ϕ</u> e o <u>maior valor de γ_{sat}</u> do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u>
COM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS		
G	Média Literatura (geotecnia)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu</u> para cada <u>unidade geotécnica</u>
H	Média (geotecnia)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u> para cada <u>unidade geotécnica</u>
I	Média (modelado relevo)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u> para cada <u>modelado de relevo</u>
J	Média (geotecnia + modelado relevo)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u> para cada <u>unidade geotécnica e modelado de relevo</u>
K	Média (altitude)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u> para cada <u>intervalo de altitude</u>
L	Média (declividade)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u> para cada <u>intervalo de declividade em graus</u>
M	Média (orientação encosta)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u> para cada tipo de <u>orientação das encostas</u>
N	Média (forma encosta)	<u>média aritmética</u> para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da <u>bacia hidrográfica do Ribeirão Baú</u> para cada tipo de <u>forma das encostas</u>
O	Interpolação	<u>interpolação</u> dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados por meio de krigagem para a <u>área da bacia hidrográfica</u>

Fonte: elaborado pela Autora.

4.6.2.1 Espessura de ruptura do solo

Além de utilizar como valor da espessura de ruptura do solo (z) as profundidades de 2, 5, 7 e 10 metros, foram elaborados cenários com a espacialização do valor de z ao longo da bacia hidrográfica em um *software* de geoprocessamento por meio de álgebra de mapas (Quadro 16). As equações matemáticas utilizadas foram as propostas por Saulnier, Beven e Obled (1997) e Silva (2010).

Quadro 16 - Ferramenta do *software* de geoprocessamento para álgebra de mapas.

Ferramenta utilizada			Tipo
<i>Spatial Analyst Tools</i>	<i>Map Algebra</i>	<i>Raster Calculator</i>	Álgebra de camadas matriciais

Fonte: elaborado pela Autora

Saulnier, Beven e Obled (1997) apresentaram duas equações empíricas para determinação da profundidade do solo em toda a extensão de uma bacia hidrográfica. Na primeira equação a profundidade do solo é inversamente proporcional à elevação (Equação 21).

$$z_i = z_{max} - \left(\frac{z_{max} - z_{min}}{e_{max} - e_{min}} \right) \cdot (e_i - e_{min}) \quad (21)$$

Onde z_i é a profundidade do solo em determinado ponto, em m; e_i é a elevação no mesmo ponto, em m; z_{max} e z_{min} são valores máximo e mínimo para a profundidade, respectivamente; e e_{max} e e_{min} são valores máximo e mínimo de elevação na bacia hidrográfica, respectivamente.

Na segunda equação a profundidade do solo é inversamente proporcional à declividade (Equação 22).

$$z_i = z_{max} - \left(\frac{z_{max} - z_{min}}{\tan\theta_{max} - \tan\theta_{min}} \right) \cdot (\tan\theta_i - \tan\theta_{min}) \quad (22)$$

Onde z_i é a profundidade do solo em determinado ponto, em m; θ_{max} e θ_{min} são a declividade máxima e mínima da bacia, respectivamente; e θ_i é a declividade da encosta em determinado ponto, em graus.

Silva (2010) desenvolveu um modelo hidrológico com considerações a respeito da distribuição espacial da profundidade do solo e utilizou a média aritmética das profundidades calculadas com as Equações 21 e 22. Adotou-se, nas equações, a profundidade mínima (z_{min}) e máxima (z_{max}) da superfície de ruptura do solo os valores de 0 e 10 metros, respectivamente, conforme média das observações em campo das profundidades nas cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008.

4.6.1 Modelagem com o SHALSTAB

O modelo SHALSTAB foi executado em um *software* de geoprocessamento por meio da ferramenta *Automatic SHALSTAB Analysis* (ASA) descrita por Sbroglia *et al.* (2017). A ferramenta, a qual é adicionada ao *Toolbox* do *software*, contém a rotina automatizada da equação matemática do SHALSTAB (Equação 14).

Os dados de entrada para a ferramenta ASA são: Modelo Digital de Elevação (MDE) hidrologicamente consistido no formato matricial (*raster*), área de contribuição por comprimento de contorno unitário (*a/b*) no formato matricial (*raster*) e cenário de espacialização dos parâmetros geotécnicos no formato vetorial.

Para os parâmetros dos solos, foram utilizados valores de intercepto de coesão (c), em Pa, ângulo de atrito (ϕ), em graus, massa específica saturada do solo (ρ_{sat}), em kg/m^3 , e cenários de profundidade de ruptura do solo (z), em metros. Os parâmetros massa específica da água (ρ_w) e aceleração da gravidade (g) foram constantes nos valores de 1.000kg/m^3 e $9,81\text{m/s}^2$, respectivamente.

Na ferramenta ASA, a partir dos dados de entrada, são criadas automaticamente camadas intermediárias no formato matricial (*raster*), por meio das quais é realizado o cálculo matemático do SHALSTAB e obtém-se como dado de saída um mapa em formato matricial (*raster*) com as sete classes referentes às condições de estabilidade das encostas, expressas em função de $\text{Log}(q/T)$, conforme ilustrado no Quadro 17. De acordo com Dietrich e Montgomery (1998), os dados são plotados em intervalos de $0,3 \text{Log}(q/T)$, que são equivalentes a intervalos em que a precipitação varia por um fator de 2.

Quadro 17 - Classes de estabilidade geradas pela modelo SHALSTAB em função de $\text{Log}(q/T)$.

Classes de estabilidade	
	Incondicionalmente instável
	$< -3,1$
	$-3,1$ a $-2,8$
	$-2,8$ a $-2,5$
	$-2,5$ a $-2,2$
	$> -2,2$
	Incondicionalmente estável

Fonte: elaborado pela Autora.

4.6.2 Validação das modelagens

A validação dos cenários de suscetibilidade a deslizamentos foi realizada por meio da elaboração das curvas de predição, conforme Chung e Fabbri (2003), e da determinação da respectiva Área Abaixo da Curva (AAC).

Essas curvas relacionam a porcentagem acumulada de cada classe de estabilidade do SHALSTAB (eixo das abcissas) com a porcentagem acumulada da área deslizada em cada uma dessas classes (eixo das ordenadas), ambos os eixos devem se apresentar de maneira decrescente, iniciando pela classe mais instável. Dessa forma, dentre as curvas elaboradas, a que se distanciar do eixo das abcissas e alcançar a proporção de 100% das células deslizadas mais rapidamente é a que representa o cenário de maior capacidade preditiva de deslizamentos (REMONDO *et al.*, 2003).

Para a elaboração das curvas de predição foram utilizadas as superfícies de ruptura mapeadas do inventário de cicatrizes para os deslizamentos de novembro de 2008 classificados como translacionais.

Devido ao elevado número de modelagens realizadas, com o intuito de comparar os diferentes resultados gráficos e definir os cenários de maior capacidade preditiva, utilizou-se o método quantitativo denominado Área Abaixo da Curva (AAC) ou *Area Under the Curve* (AUC). Assumindo que a curva é composta por pequenos segmentos de reta, é possível calcular a área situada entre as curvas de predição e o eixo das abcissas.

Para o cálculo automático da AAC foi utilizada a versão disponibilizada gratuitamente do *software GraphPad Prism*. Os valores variam de 0 a 1, segundo Beguería (2006), quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade da modelagem; valor de AAC de 0,5, expresso pela linha diagonal da curva de predição, relaciona-se a uma classificação aleatória; e valores abaixo de 0,5 evidenciam modelos com uma capacidade preditiva menor que o aleatório, não devendo ser considerados.

A partir dos valores de AAC foi realizada a classificação das modelagens por meio dos intervalos definidos por Thuiller *et al.* (2010). Destaca-se que mesmo na eventual presença de um modelo preditivo perfeito, não é possível ser obtido o valor de AAC igual a 1 em uma curva de predição, uma vez que para alcançar o somatório da área deslizada será necessário, no mínimo, o mesmo valor da área de estudo para validar esses deslizamentos. Sendo assim, um

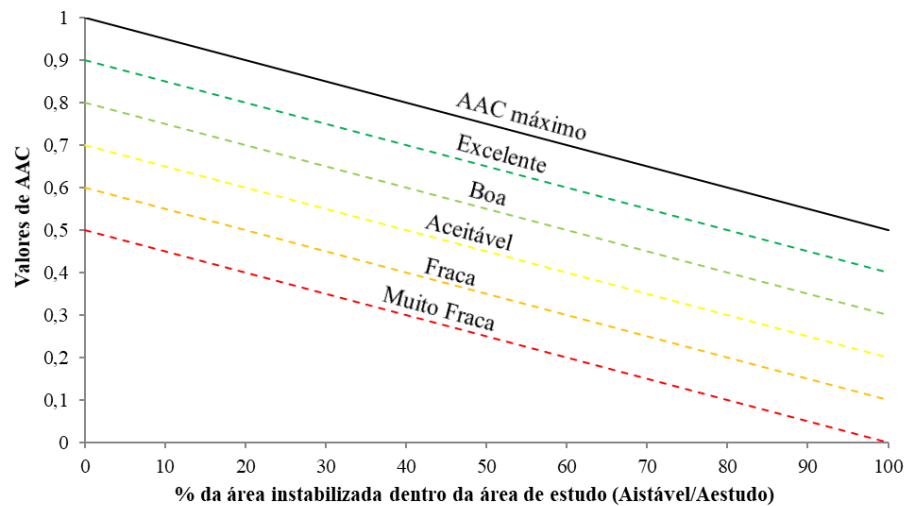
incremento de 5% da área instabilizada acarreta uma redução de 0,025 no valor de AAC (OLIVEIRA, 2012).

Dessa forma, os valores propostos pelos autores foram reavaliados por meio do cálculo do valor máximo da Área Abaixo da Curva ($AAC_{máx}$), obtido por meio da Equação 23 (Figura 52). O valor máximo de AAC varia entre $0,5 \leq AAC_{máx} \leq 1$.

$$AAC_{máx} = 1 - \frac{A_{instável} / A_{estudo}}{2} \quad (23)$$

Onde, $A_{instável}$ a área das cicatrizes utilizada para validar o modelo e A_{estudo} a área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

Figura 52 - Reclassificação dos intervalos definidos por Thuiller *et al.* (2010) com base no valor de AAC máximo.

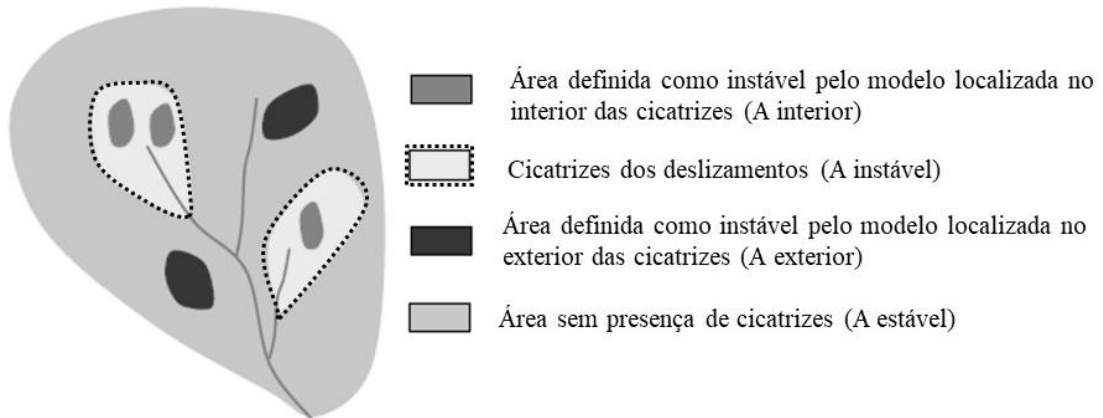


Fonte: elaborado pela Autora.

4.6.3 Comparação entre as modelagens com melhor validação

A comparação entre o desempenho dos cenários de suscetibilidade a deslizamentos que apresentaram maior capacidade preditiva foi realizada por meio do Índice de Acerto (IA) e Índice de Erro (IE) propostos por Sorbino, Sica e Cascini (2010). A Figura 53 apresenta a definição das áreas para a realização do cálculo desses índices.

Figura 53 - Definição das áreas utilizadas no cálculo dos Índices de Acerto e Erro.



Fonte: adaptado de Michel, Kobiyama e Goerl (2014).

O Índice de Acerto (IA) representa a porcentagem de área definida como instável pelo SHALSTAB, representada pelas classes incondicionalmente instável e $\text{Log}(q/T) < -3,1$, que coincide com a área de ocorrência das superfícies de ruptura nas cicatrizes de deslizamentos, denominada $A_{interior}$ (Equação 24).

$$IA = \frac{A_{interior}}{A_{instável}} \cdot 100 \quad (24)$$

O Índice de Erro (IE) representa a razão percentual entre as áreas definidas como instáveis pelo modelo que não coincidem com a área de ocorrência das superfícies de ruptura e as áreas da bacia hidrográfica que não foram afetadas por deslizamentos, denominadas $A_{exterior}$ (Equação 25).

$$IE = \frac{A_{exterior}}{A_{estável}} \cdot 100 \quad (25)$$

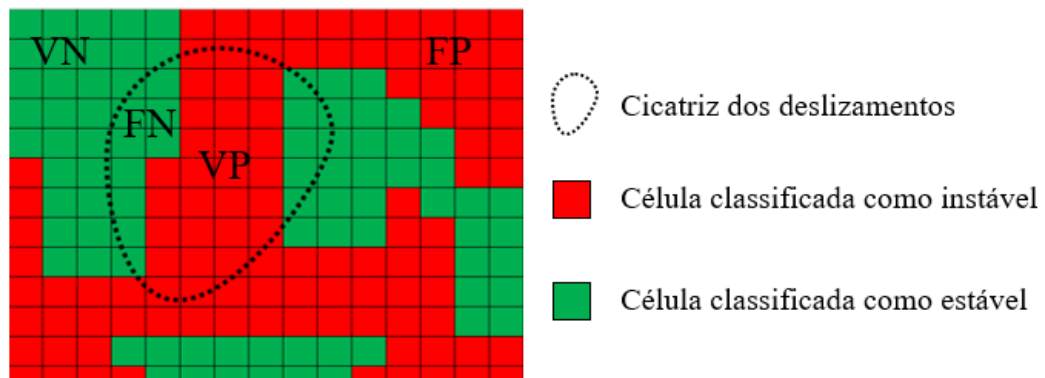
Para os autores, o cenário que melhor descreve o fenômeno é aquele que obtém a maior relação IA/IE. Nesse sentido, por meio dessa análise é avaliada a taxa de acerto do modelo em representar áreas instáveis nos locais onde de fato ocorreram deslizamentos juntamente a capacidade de não superestimar as áreas instáveis. Valores abaixo de 1 indicam muitas áreas consideradas instáveis pelo modelo localizadas no exterior da cicatriz de deslizamento, em relação às áreas localizadas no interior - acertos (SORBINO; SICA; CASCINI, 2010).

Ainda, para os cenários com maior valor de IA/IE foi elaborada a respectiva Matriz de Confusão. Dessa forma, a camada matricial (*raster*) da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foi classificada em estável (classes $\text{Log}(q/T) -2,5$ a $-2,2$; $\text{Log}(q/T) > -2,2$ e Incondicionalmente

estável do SHALSTAB) e instável (classes Incondicionalmente instável, $\text{Log}(q/T) < -3,1$; $\text{Log}(q/T) -3,1$ a $-2,8$ e $\text{Log}(q/T) -2,8$ a $-2,5$ do SHALSTAB).

A partir do número de células (*pixels*) em cada uma das duas classes foi possível calcular quantas localizavam-se no interior de deslizamentos e quantas no exterior. Nesse sentido, se uma célula (*pixel*) foi classificada como instável e localiza-se dentro da superfície de ruptura do deslizamento, ela é considerada como Verdadeiro Positivo (VP), e quando se localiza fora da superfície de ruptura é considerada como Falso Positivo (FP). Se uma célula (*pixel*) classificada como estável corresponde a uma célula localizada no interior da superfície de ruptura é considerada como Falso Negativo (FN), e se localizar-se no exterior, é classificada como Verdadeiro Negativo (VN), conforme é demonstrado na Figura 54.

Figura 54 - Definição dos valores de VP, FP, FN e VN.



Fonte: elaborado pela Autora.

A partir desses valores, foi possível calcular as seguintes estatísticas de precisão: Eficiência (proporção de acertos), Taxa de Classificação Incorreta (proporção de erros), Sensibilidade (verdadeiros positivos), Especificidade (verdadeiros negativos), e avaliar os casos supostamente mal classificados (falsos positivos e falsos negativos), conforme apresentado no Quadro 18.

Quadro 18 - Cálculo das estatísticas de precisão derivadas da Matriz de Confusão.

Eficiência	$(VP + VN) / (VP + FP + FN + VN)$
Taxa de Classificação Incorreta - TCI	$(FP + FN) / (VP + FP + FN + VN)$
Sensibilidade	$VP / (VP + FN)$
Especificidade	$VN / (FP + VN)$
Taxa de Falsos Positivos - TFP	$FP / (FP + VN)$
Taxa de Falsos Negativos - TFN	$FN / (VP + FN)$

Fonte: adaptado de Beguería (2006).

4.6.4 Elaboração do mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais

Foi elaborado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú a partir da classificação do cenário que apresentou a maior capacidade preditiva, ou seja, maior valor de Área Abaixo da Curva de predição e a maior relação IA/IE. Contudo, a fim de comparar o mapa de suscetibilidade com outros trabalhos realizados na mesma área de estudo, artigo publicado na revista *Landslides* (SBROGLIA *et al.*, 2018b) e dissertação de Mestrado (FLACH, 2020), foi realizada a validação do cenário com o mesmo método utilizado pelos referidos autores.

Dessa forma, identificou-se em cada polígono de superfície de ruptura o valor mínimo de instabilidade, ou seja, dentre as classes do SHALSTAB, a mais instável. Assim, esses valores foram utilizados para a elaboração da curva de predição. A ferramenta empregada para determinação dos valores em cada superfície de ruptura dos deslizamentos translacionais é apresentada no Quadro 19.

Quadro 19 - Ferramenta do *software* de geoprocessamento utilizada para a validação.

Ferramenta utilizada		Tipo de estatística
<i>Spatial Analyst Tools</i>	Zonal	Zonal Statistics
		Mínimo

Fonte: elaborado pela Autora.

Esse método também foi empregado por Montgomery e Dietrich (1994), Dietrich *et al.* (1998) e Dietrich, Bellugi e Asua (2001). De acordo com os autores, a utilização dessa abordagem se dá devido às incertezas na localização precisa da cicatriz, dessa forma, assumem que a célula (*pixel*) mais instável conforme o modelo controla a estabilidade do deslizamento.

Por fim, apresentou-se o mapa de suscetibilidade a deslizamentos em três classes com cores semaforicas, sendo que o vermelho (perigo) representa as áreas de alta suscetibilidade, o amarelo (atenção) representa a média suscetibilidade e o verde (seguro) representa as áreas de baixa suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos por meio do método adotado. Embora se desconheça um sistema unificado de classificação que possa ser adotado internacionalmente, a definição das classes foi similar a algumas propostas expressas na literatura (BARELLA, 2016; MONTANDON, 2017). Dessa forma, é possível comparar o desempenho de outros modelos de suscetibilidade empregados para diferentes áreas ou utilizando diferentes inventários de deslizamentos, uma vez que a avaliação é feita em função da respectiva capacidade preditiva.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

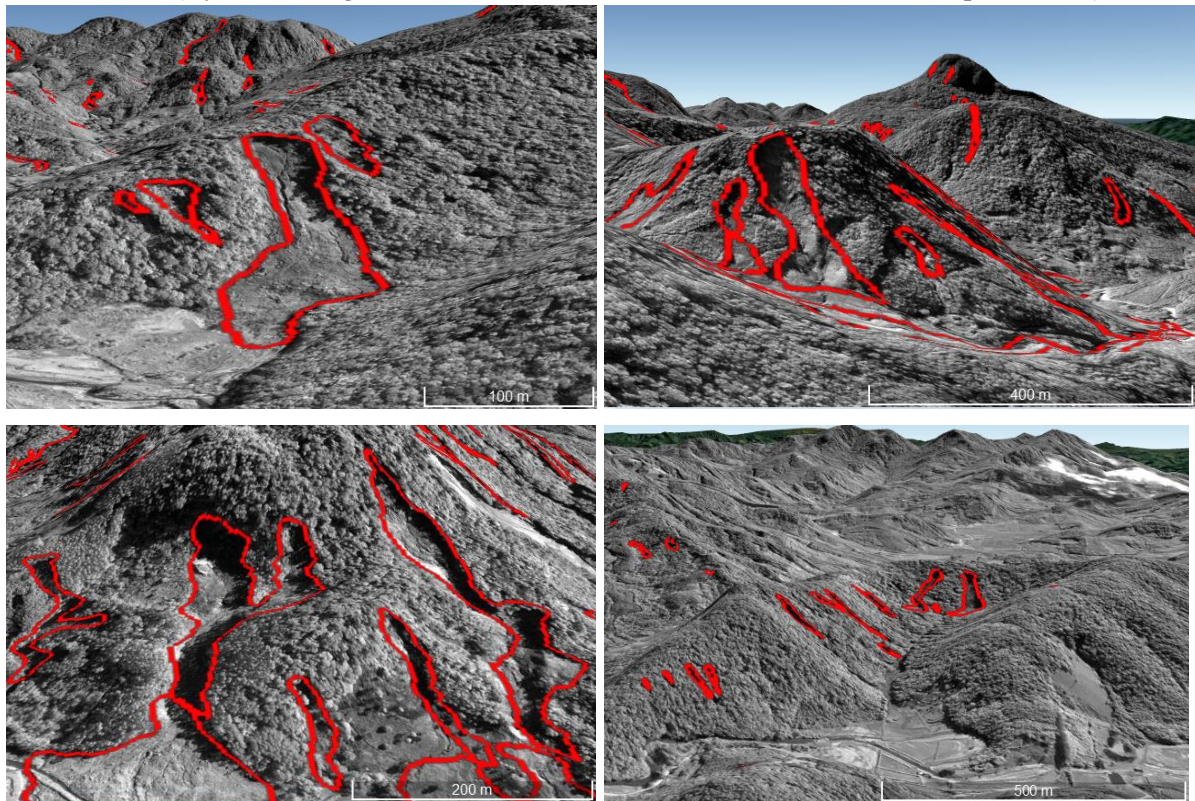
Este capítulo subdivide-se em: análise dos parâmetros morfológicos das encostas, para duas escalas, nas superfícies de ruptura das cicatrizes dos deslizamentos de novembro de 2008, validação do ensaio BST em laboratório, execução de ensaios BST na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, elaboração do banco de dados georreferenciado para a área em estudo e, a partir dele, elaboração dos cenários de espacialização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, uso de modelagem matemática na identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos, validação e comparação dos resultados obtidos, e, por fim, elaboração do mapa em três classes de suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos translacionais para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

5.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS MORFOLÓGICOS NAS CICATRIZES DOS DESLIZAMENTOS

A análise se deu por meio dos índices de Gao (1993) que, a partir dos deslizamentos ocorridos em 1969 no Estado de Virgínia (EUA), analisou a influência de variáveis topográficas como declividade, forma e orientação das encostas e, dessa forma, identificou um Potencial de Deslizamentos (PD), denominado “*landsliding potential*”.

O mapeamento das cicatrizes dos deslizamentos translacionais e rotacionais ocorridos em novembro de 2008 permitiu a identificação de 535 superfícies de ruptura. Destaca-se que as cicatrizes de deslizamentos visualizadas na Figura 55 e no campo não representam necessariamente um único evento de ruptura, pois a perda de suporte lateral e basal provocada por um primeiro movimento pode desencadear outras rupturas. Por sua vez, as corridas de detritos mobilizaram grande quantidade de sedimentos, os quais foram observados em campo como blocos e matacões de tamanhos variados, entretanto, elas foram desencadeadas, possivelmente, por uma ruptura inicial cujo material apresentava alto teor de umidade.

Figura 55 - Cicatrizes de deslizamentos mapeadas na área de estudo com o auxílio de imagens de satélite (*software Google Earth*, visualização do relevo em 3D, fator de ampliação 1,5).



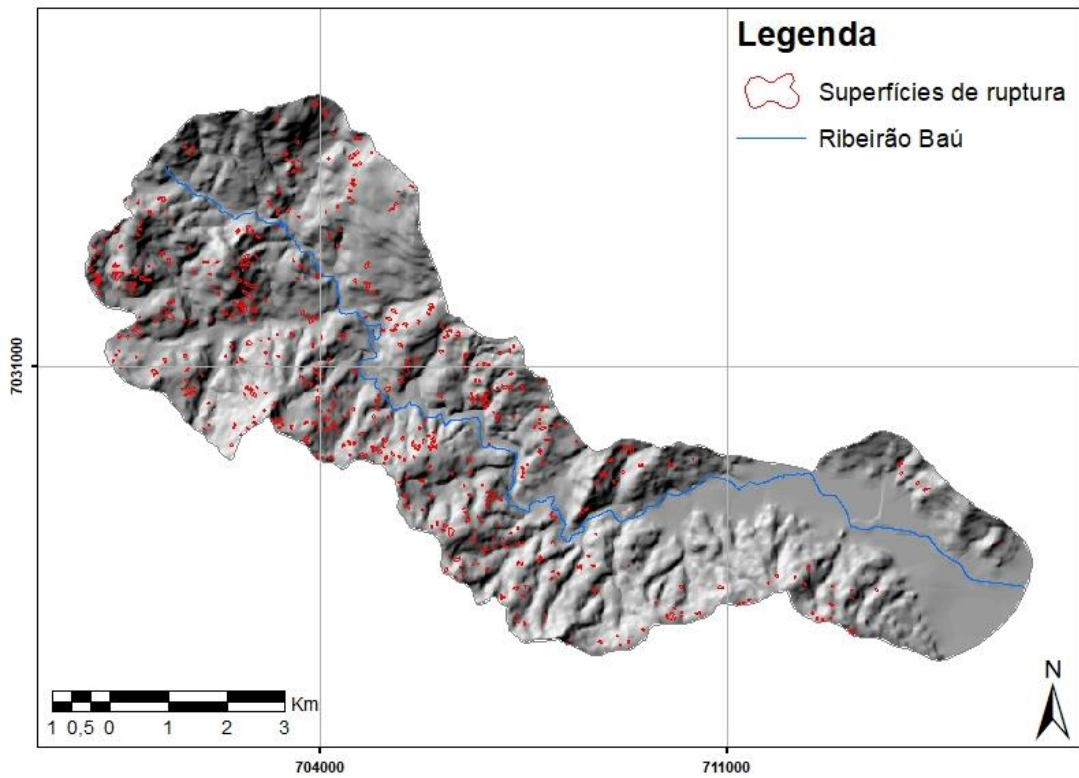
Fonte: elaborado pela Autora.

Para análise dos índices de Gao (1993), foram utilizados os Modelos Digitais de Elevação (MDE) elaborados anterior e posteriormente ao desastre natural de 2008, compostos por células (*pixels*) com resoluções espaciais distintas.

O MDE com resolução espacial de 10m da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú é composto por 626.525 células, das quais 7.901 (1,26%) correspondem às superfícies de ruptura de deslizamentos. A Figura 56 apresenta a sobreposição do relevo sombreado com o inventário das superfícies de ruptura das cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008.

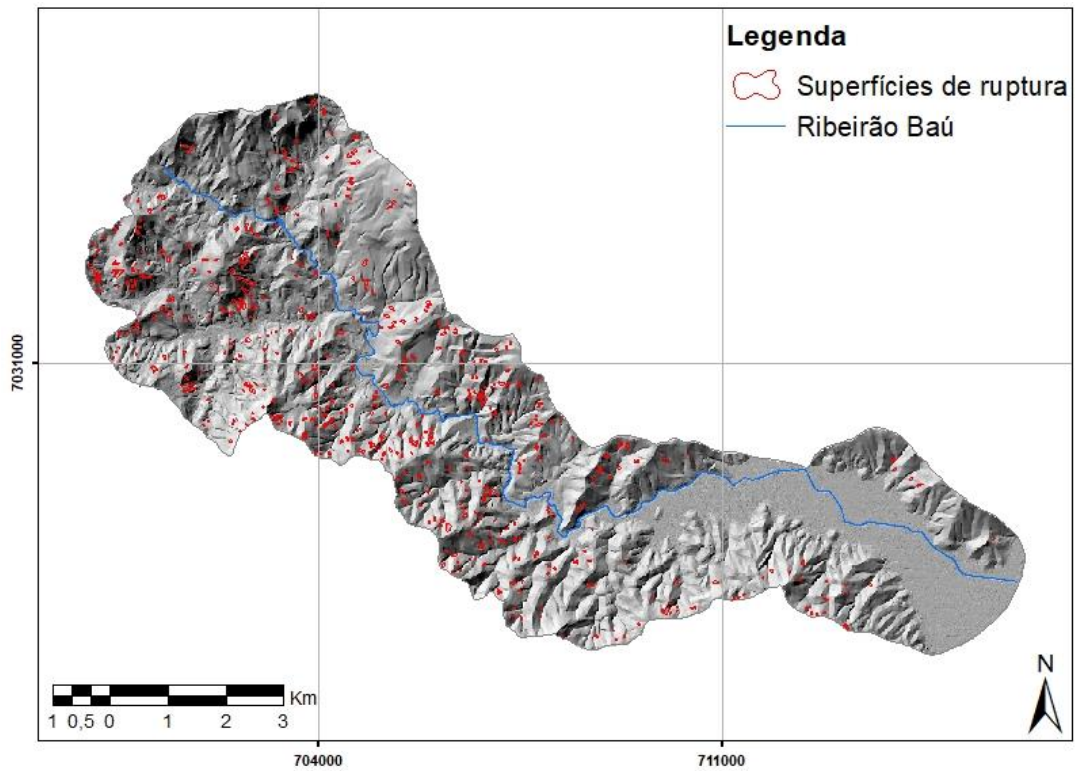
O MDE com resolução espacial de 1m da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú é composto por 62.652.306 células, das quais 794.326 (1,27%) correspondem às superfícies de ruptura de deslizamentos. A Figura 57 apresenta a sobreposição do relevo sombreado com o inventário das superfícies de ruptura das cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008.

Figura 56 - Relevo sombreado obtido a partir do MDE (*pixel* 10m), com as superfícies de ruptura.



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 57 - Relevo sombreado obtido a partir do MDE (*pixel* 1m), com as superfícies de ruptura.

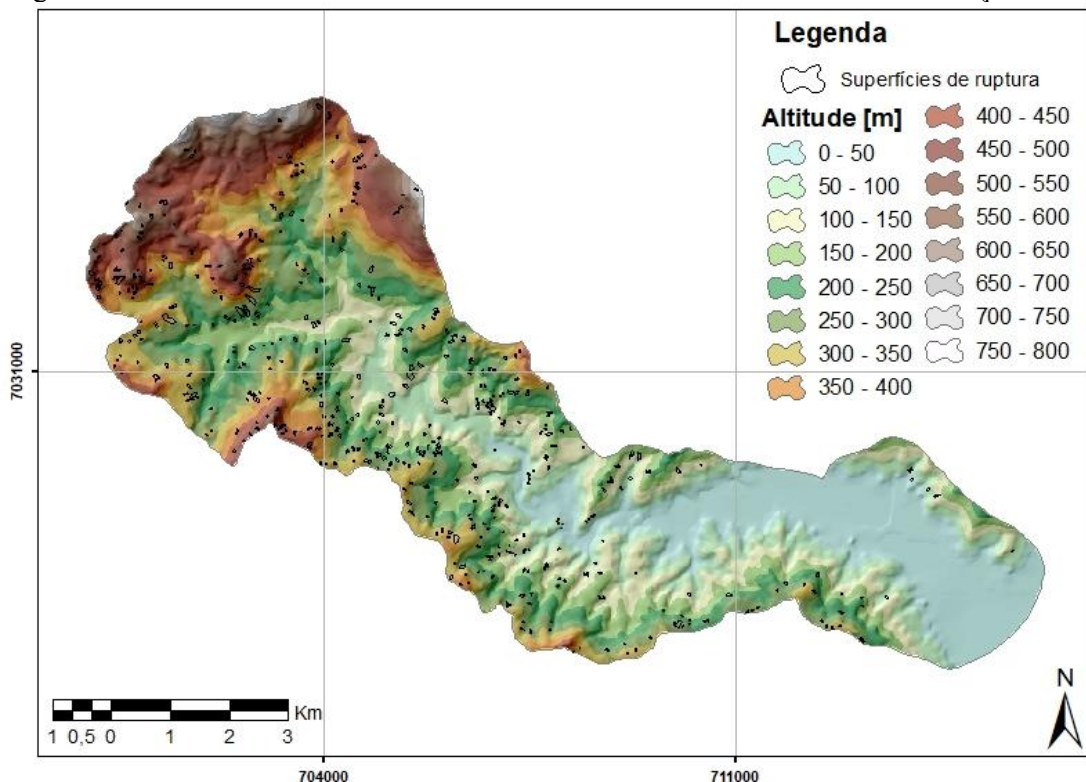


Fonte: elaborado pela Autora.

A ocorrência de deslizamentos em relação à altitude pode estar relacionada a fatores como a variação do volume pluviométrico, devido ao efeito orográfico, espessura e características do solo ou estar associada a outros aspectos morfológicos das encostas. Nas Figuras 58 e 59 são apresentadas as altitudes na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú a partir do MDE com resolução espacial de 10 e 1m, respectivamente, classificadas a cada 50 metros.

A partir dos mapas e gráficos das Figuras 60 e 61, observa-se que as altitudes com maior Frequência (F) na bacia hidrográfica são até 250 metros, representando soma de 61 e 65% no MDE com resolução espacial de 10 e 1m, respectivamente. A maior parte da área varia de 0 a 50 metros (sendo 17,53% no MDE de resolução de 10m e 18,91% no MDE de resolução espacial de 1m). O terço superior, ou seja, altitudes acima de 600 metros apresentam a menor área na bacia hidrográfica, menos de 1% em cada classe, para as duas resoluções.

Figura 58 - MDE classificado em intervalos de altitudes da bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 10m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 59 - MDE classificado em intervalos de altitudes da bacia do Ribeirão Baú (pixel 1m).

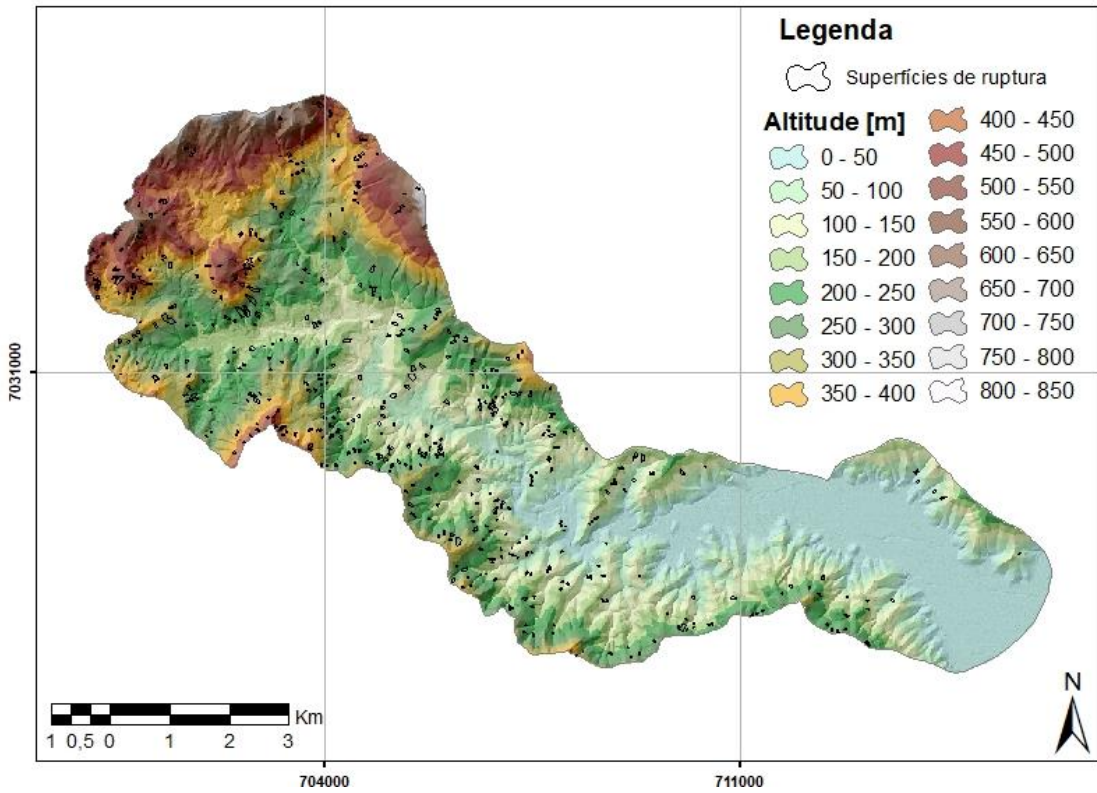


Figura 60 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à altitude nas encostas (resolução espacial 10m).

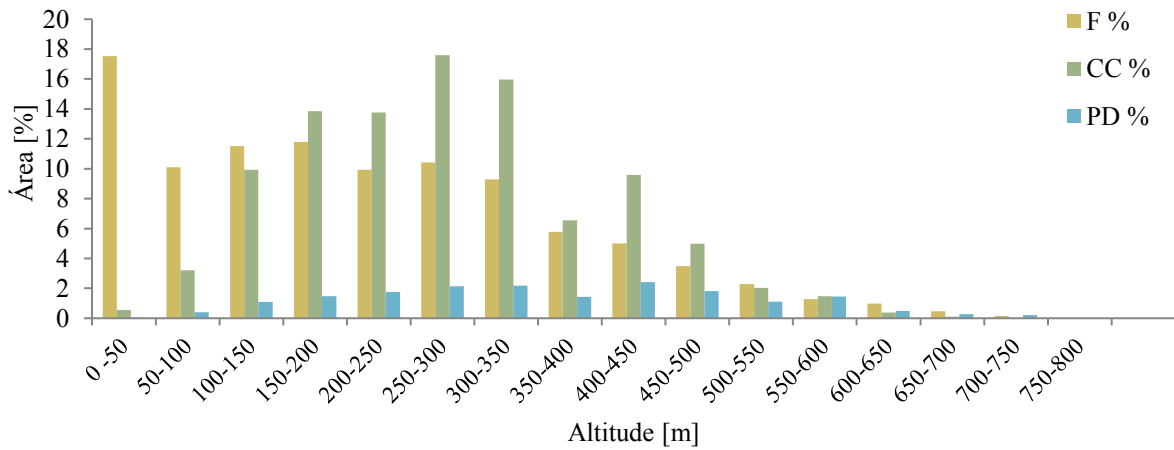
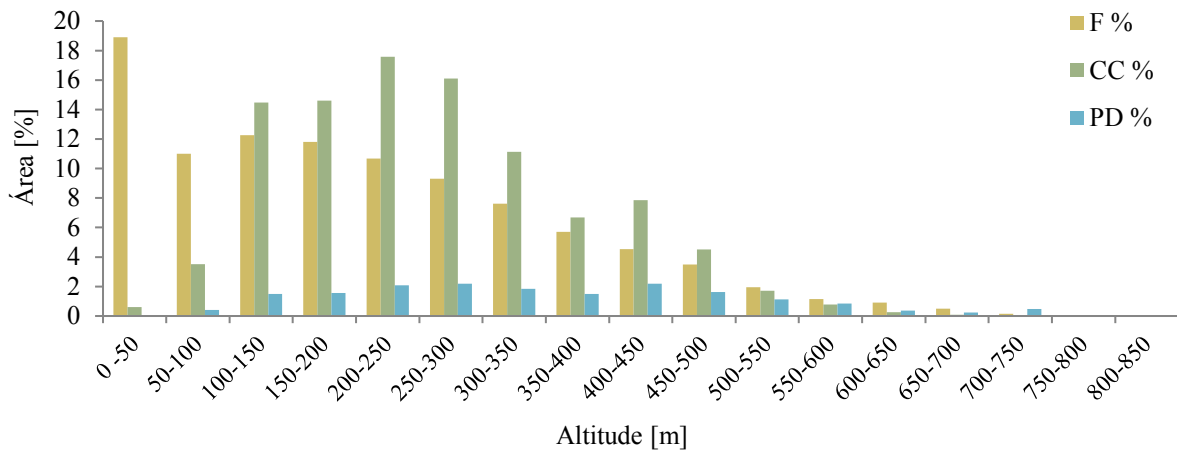


Figura 61 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à altitude nas encostas (resolução espacial 1m).



Fonte: elaborado pela Autora.

As maiores porcentagens de Concentração de Cicatrizes (CC) são no terço inferior, nas altitudes de 200 a 350 metros. As classes com maior porcentagem de cicatrizes no mapa com resolução de 10m foram 250 a 300 metros (17,59%) e 300 a 350 metros (15,97%). Por sua vez, as classes com maior porcentagem de cicatrizes no mapa com resolução de 1m foram 200 a 250 metros (17,58%) e 250 a 300 metros (16,11%).

Em relação ao Potencial de Deslizamento (PD), os maiores valores ocorreram nos terços inferiores e médio da bacia hidrográfica. Para a resolução espacial de 10m, os maiores valores ocorreram nas altitudes de 400 a 450 metros (2,42%), 300 a 350 metros (2,17%) e 250 a 300 metros (1,58%), para a resolução espacial de 1m, os maiores valores de PD foram nas altitudes de 400 a 450 metros (2,20%), 250 a 300 metros (2,19%) e 200 a 250 metros (2,09%).

Resultado semelhante foi encontrado por Martins *et al.* (2017), em que 51% dos deslizamentos ocorridos em 2011 estiveram localizados nos terços inferior e médio das encostas das bacias hidrográficas do Bom Brinquedo e das Laranjeiras, município de Antonina (PR).

Marcelino (2003) também observou que a maior parte dos deslizamentos (83,88%) ocorreu no intervalo de 50 a 500m de altitude nas encostas do município de Caraguatatuba (SP), de acordo com o autor, essa faixa corresponde às médias encostas onde o manto de intemperismo é mais espesso do que nas altas encostas e está associada à alta declividade e densidade de drenagem. Sestini (2000), analisando as encostas da Serra do Mar no mesmo município, verificou que houve um predomínio de cicatrizes na faixa de 100 a 300m de altitude, e uma incidência nula a baixa nas faixas de 0 a 100 e acima de 900m.

De acordo com Vanacôr e Rolim (2012), as classes representadas pelas médias encostas da região nordeste do Rio Grande do Sul foram as que apresentaram maior ocorrência de deslizamentos. Nas encostas dos vales dos rios Cubatão e Moji (SP), por sua vez, foi observado um maior número de cicatrizes de deslizamentos ocorridos em 1985 e em 1994 nos terços médio e superior (LOPES, 2006; VIEIRA, 2007). Para os autores, tais resultados indicam suscetibilidade das encostas a deslizamentos translacionais rasos nesses intervalos altimétricos para a Serra do Mar.

Os menores valores de PD ocorreram nas classes extremas de altitude da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, nos intervalos menores que 50 metros e maiores de 750 metros. Ainda, ocorreu ausência de cicatrizes nas altitudes acima de 750m. Essas áreas caracterizam-se por apresentar os mais baixos e altos valores de declividades respectivamente, áreas de altitudes menores que 50 metros são predominantemente planas e as de altitude acima de 750 metros representam, em maior parte, os paredões rochosos verticais do Morro Baú. Assim como observado nesta pesquisa, Guimarães *et al.* (1998) e Guimarães (2000), utilizando os índices de Gao (1993) no município de Rio de Janeiro, verificou um aumento do PD até 800m e uma sensível redução desse índice a partir dessa altitude.

A declividade fornece a medida de inclinação do relevo em relação ao plano do horizonte. A velocidade de deslocamento de um material é diretamente proporcional à declividade. Essa variável possui elevada importância nos processos geomorfológicos, condicionando cursos de água e deslocamento de colúvio (CHRISTOFOLLETI, 1979).

As Figuras 62 e 63 apresentam as declividades que ocorrem na bacia do Ribeirão Baú para as resoluções espaciais de 10 e 1m, respectivamente, classificadas a cada 5°, até a declividade de 45° (equivalente a 100%).

Conforme se pode observar nas Figuras 64 e 65, as declividades que ocorrem com maior Frequência (F) nas encostas da bacia do Ribeirão Baú são entre o intervalo de 10 a 20° para a resolução de 10m e 15 a 30° para a resolução de 1m. Ainda, foi observada maior porcentagem das declividades mais suaves no relevo de resolução espacial menor. Ocorrem em maior área classes de declividade entre 15 e 20° (19,02%), para a resolução de 10m, e entre 20 e 25° (20,51%), para resolução de 1m.

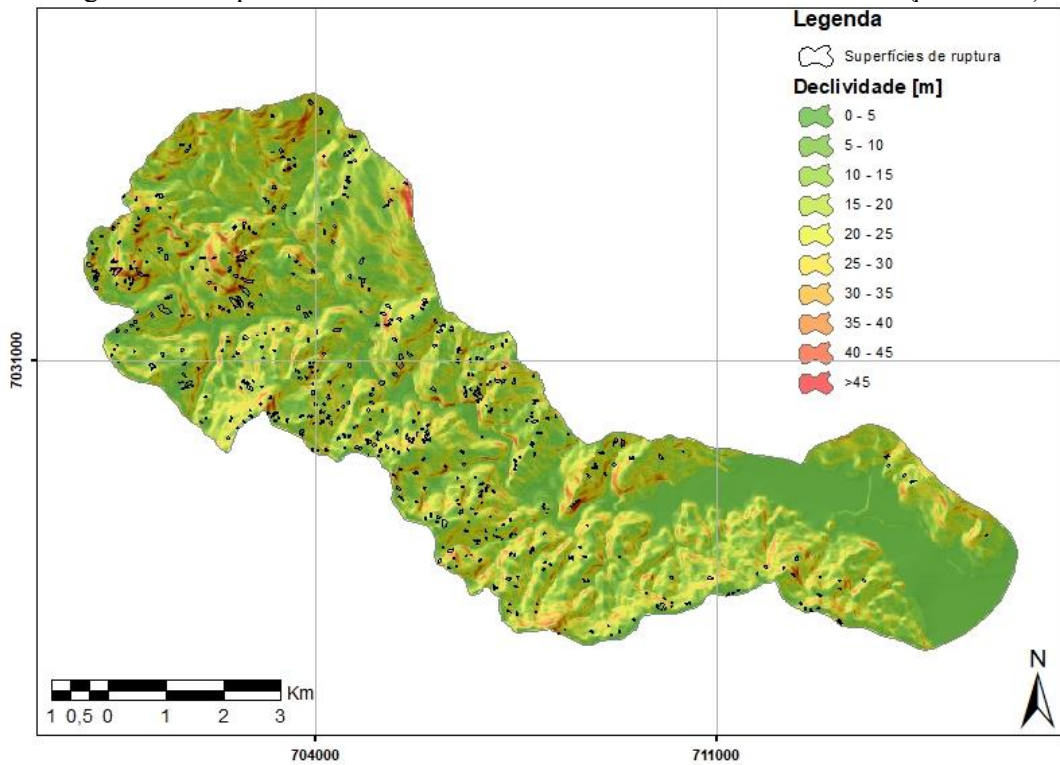
A Concentração de Cicatrizes (CC) é maior nas encostas com declividades entre 10 e 30° para a resolução de 10m e entre 20 e 35° para a resolução de 1m. A classe com maior valor

de CC ocorreu de 20 a 25° (22,07%) e de 25 a 30° de declividade (26,11%) para as resoluções 10 e 1m, respectivamente. Ângulos entre 0 e 30° estão associados, geralmente, às áreas planas da bacia, aos topos mais suaves dos principais divisores de água e aos depósitos coluvionares.

Destaca-se que ocorreu uma inversão na Frequência dos valores entre as classes de declividades de 15 a 20° e 20 a 25° para as duas resoluções, sendo que as classes até 20° foram superestimadas na resolução espacial de 10m em relação à resolução de 1m, e após 20° foram subestimadas, o mesmo acontece com a Concentração de Cicatrizes (CC). Essa inversão também foi observada por Gomes *et al.* (2005), para as mesmas escalas desta pesquisa, entretanto, o limiar de mudança observado foi entre as classes 22° a 31° e 31° a 35°. Isso demonstra a tendência de suavização do relevo à medida que a escala diminui.

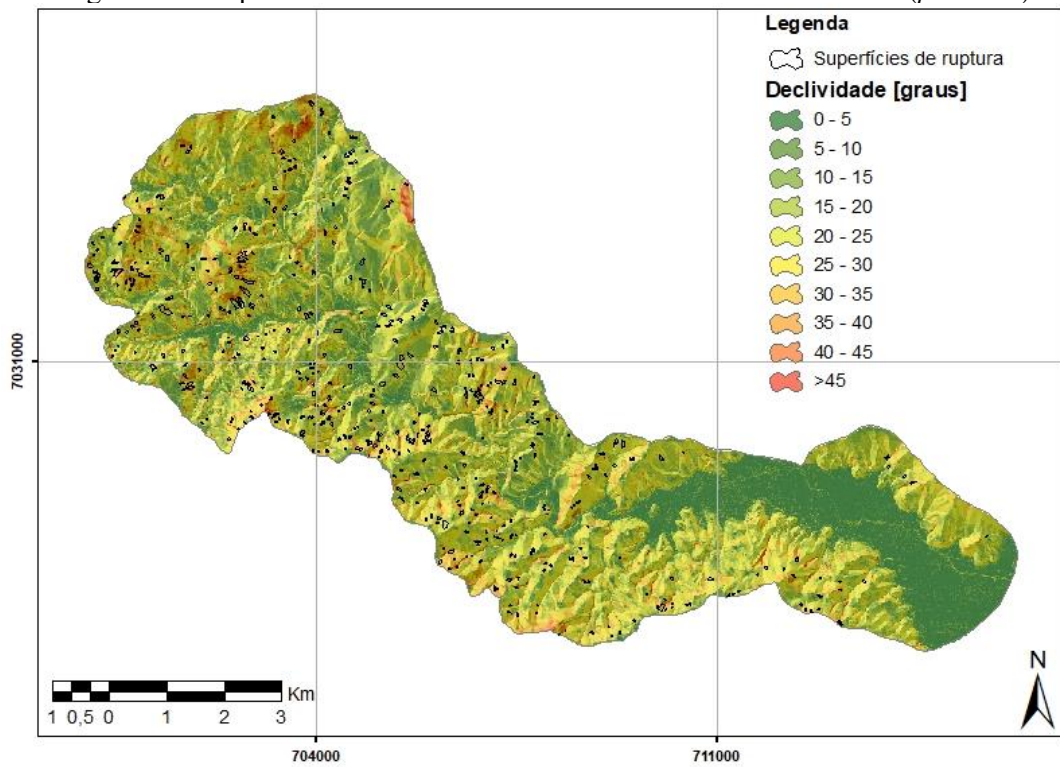
Em relação ao Potencial de Deslizamento (PD), para o mapa com resolução de 10m os maiores valores foram relacionados a encostas com declividades de 35 a 40° (2,54%). Encostas com declividade de 30 a 35° e de 40 a 45° também apresentaram valores mais altos para PD, de 2,17 e 2,38%, respectivamente. Para o mapa com resolução de 1m, os maiores valores de PD foram relacionados a encostas com declividades acima de 45° (4,57%). Encostas com declividade de 35 a 40° e de 40 a 45° também apresentaram valores altos para PD, de 3,96 e 4,49%, respectivamente. Foi observado, para ambas as resoluções, que os valores de PD apresentaram crescimento diretamente proporcional ao aumento da declividade das encostas, com exceção do valor de PD para a classe de declividade maior que 45° na resolução espacial de 10m. O limite de inversão do PD entre as escalas foi no ângulo de declividade de 25°.

Figura 62 - Mapa de declividade das encostas na bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 10m).



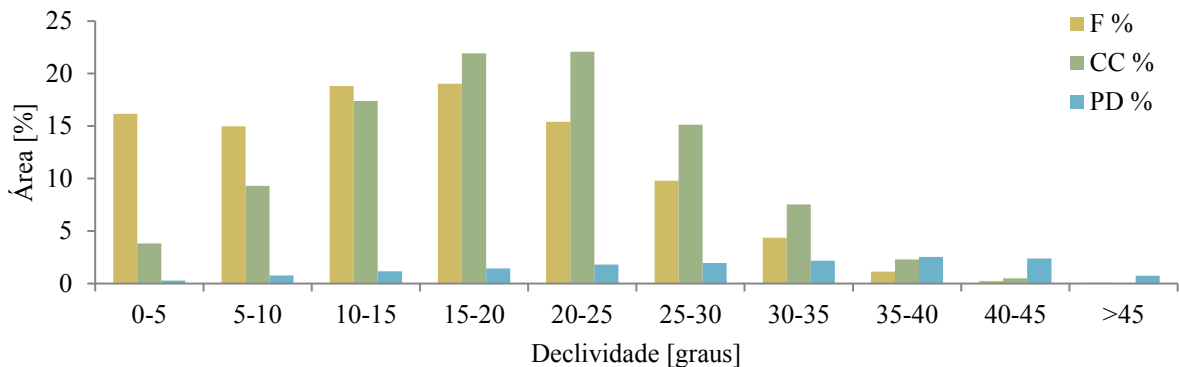
Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 63 - Mapa de declividade das encostas na bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 1m).



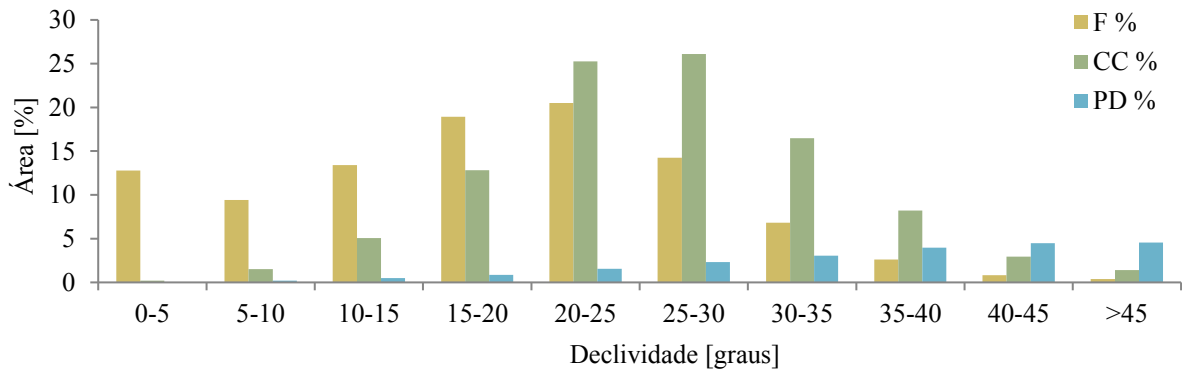
Fonte: adaptado de Sbroglia *et al.* (2018b).

Figura 64 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação às declividades das encostas (resolução espacial 10m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 65 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação às declividades das encostas (resolução espacial 1m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Estudos sobre o comportamento da declividade em relação aos deslizamentos sugerem a existência de limites críticos desse parâmetro. Sidle, Pearce e O'Loughlin (1995) relacionaram as classes de declividade à ocorrência dos tipos de movimentos de massa, dessa forma, para os autores o rastejo estaria associado a declividade de 1,3 a 25°, deslizamentos rotacionais de 7 a 18°, deslizamentos translacionais de 4 a 20° e deslizamentos translacionais com detritos sobrejacentes à rocha, acima de 25°.

Cerri e Amaral (1998) consideraram como um marco a inclinação de 8,5° a partir do qual os efeitos da declividade são mais significativos para a predisposição da encosta a ocorrência de deslizamentos. Para Fernandes e Amaral (2000), as declividades acima de 30° apresentam risco de deslizamentos mais frequente. Entretanto, acima de 60° o regolito é menos espesso e, teoricamente, diminuiria o risco de ocorrência de deslizamentos. Assim como para Guimarães (2000), que observou uma elevação do valor de PD até os 55° de inclinação nas

encostas em duas bacias localizadas no Maciço da Tijuca (RJ), para o autor, a diminuição do PD após esse valor de declividade está relacionada à presença de paredões rochosos e à ausência de solos.

Para Vieira (2007), o intervalo de 30 a 40° é o mais suscetível a deslizamentos translacionais rasos na bacia da Copebrás (SP), com 85% das cicatrizes, porém o maior valor de PD foi nas declividades de 40 a 50°. Valores similares foram encontrados por Lopes (2006) o qual identificou, em bacias do vale do Rio Moji (SP), uma pequena quantidade de cicatrizes entre 0 e 30° e 51% dos deslizamentos ocorridos em 1985 entre as declividades de 30 e 40°. Bem como para Martins *et al.* (2017), em que as classes de declividades com maior concentração de cicatrizes foi de 30 a 40° na bacia hidrográfica de Bom Brinquedo e de 20 a 40° na bacia hidrográfica de Laranjeiras (PR).

Bini (2020) realizou a análise de parâmetros morfológicos no alto vale das bacias do Ribeirão Arraial do Ouro, Baú e Braço do Baú, localizadas em Gaspar e Ilhota (SC). Foram mapeadas 639 cicatrizes de movimentos de massa, sendo 446 deslizamentos e 193 corridas de detritos, a maior parte situada na geologia do Complexo Luiz Alves. Em relação à declividade, dos 261 deslizamentos que somaram as quatro classes analisadas (declividade das rupturas: próximas ao divisor, em cabeceira de drenagem, no meio ou na base da encosta e por solapamento de corridas), a maior parte foi verificada dentro da classe de declividade de 15 a 20°, com 69 ocorrências; seguida das classes de 7 a 15°, com 42 ocorrências; 20 a 25°, com 38 ocorrências; e 25 a 35°, com 8 ocorrências de deslizamentos.

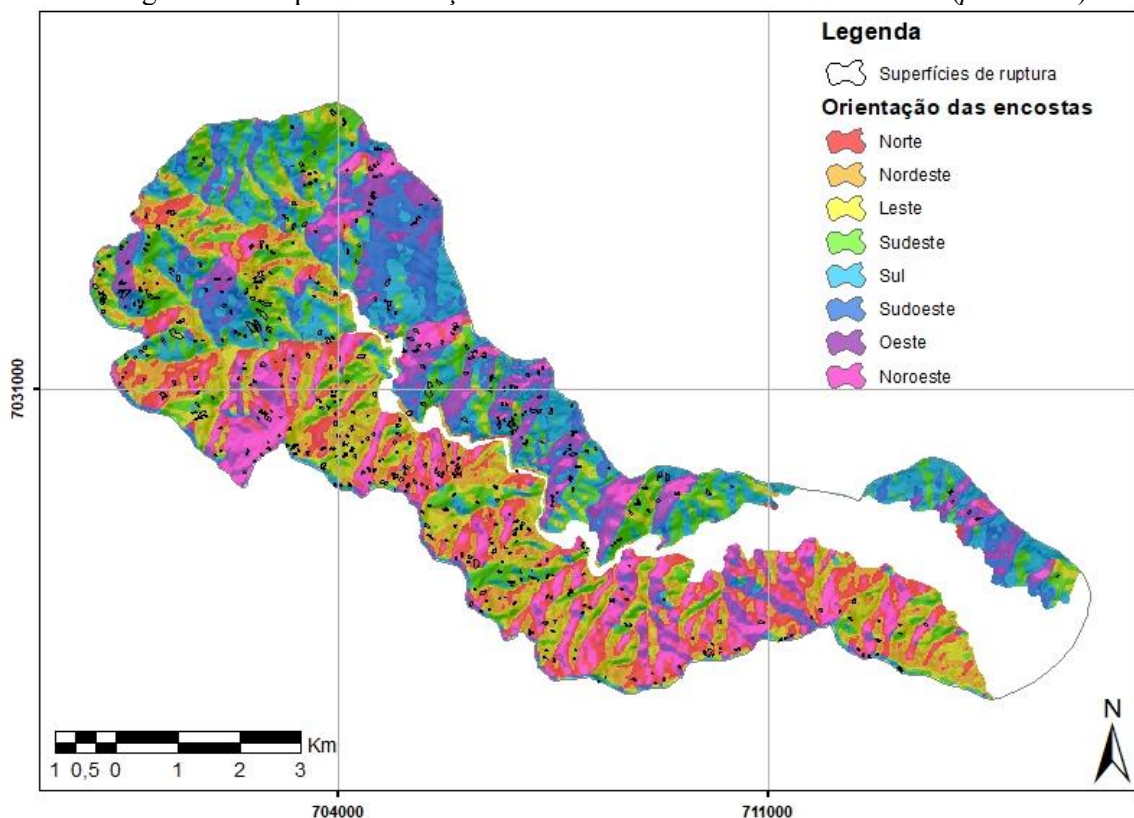
No município de Porto Alegre (RS), cerca da metade do número de cicatrizes de deslizamentos ocorreu em encostas com declividades entre 16,7 e 26,6° (BRITO *et al.*, 2016). Na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo os municípios de São Vendelino e Alto Feliz, a maior frequência de deslizamentos ocorreu nas classes com declividades entre 11 e 45° (VANACÔR; ROLIM, 2012).

Gomes *et al.* (2005), analisando as bacias hidrográficas dos Rios Quitite e Papagaio localizadas na vertente Oeste do Maciço da Tijuca (RJ), observaram que a classe com o maior PD, nas escalas 1:50.000 e 1:10.000, foi 40 a 60% (22 a 31°) de declividade. Ainda, observaram que a classe >100% (>45°) não obteve os maiores valores de PD, demonstrando que, nas duas escalas analisadas, as declividades mais altas não são as mais propícias a deslizamentos.

Nas encostas da Serra do Mar, Sestini (2000) identificou que a maior quantidade de cicatrizes de deslizamentos ocorreu na faixa de 17 a 32°. Para Marcelino (2003), nessa mesma área, a maior ocorrência de deslizamentos ocorreu entre os ângulos de 25 e 45°. Esse autor também observou que, apesar da declividade ser mais acentuada na classe >45°, apresentou baixo percentual de deslizamentos, isso se deve a pouca profundidade do manto de intemperismo existente nas altas encostas, que diminui a probabilidade de desencadear deslizamentos em função da pouca capacidade de infiltração e retenção de água no solo e redução da componente peso nos locais correspondentes a essa classe de declividade. Dessa forma, observa-se que a declividade, isoladamente, não é o fator deflagrador de deslizamentos.

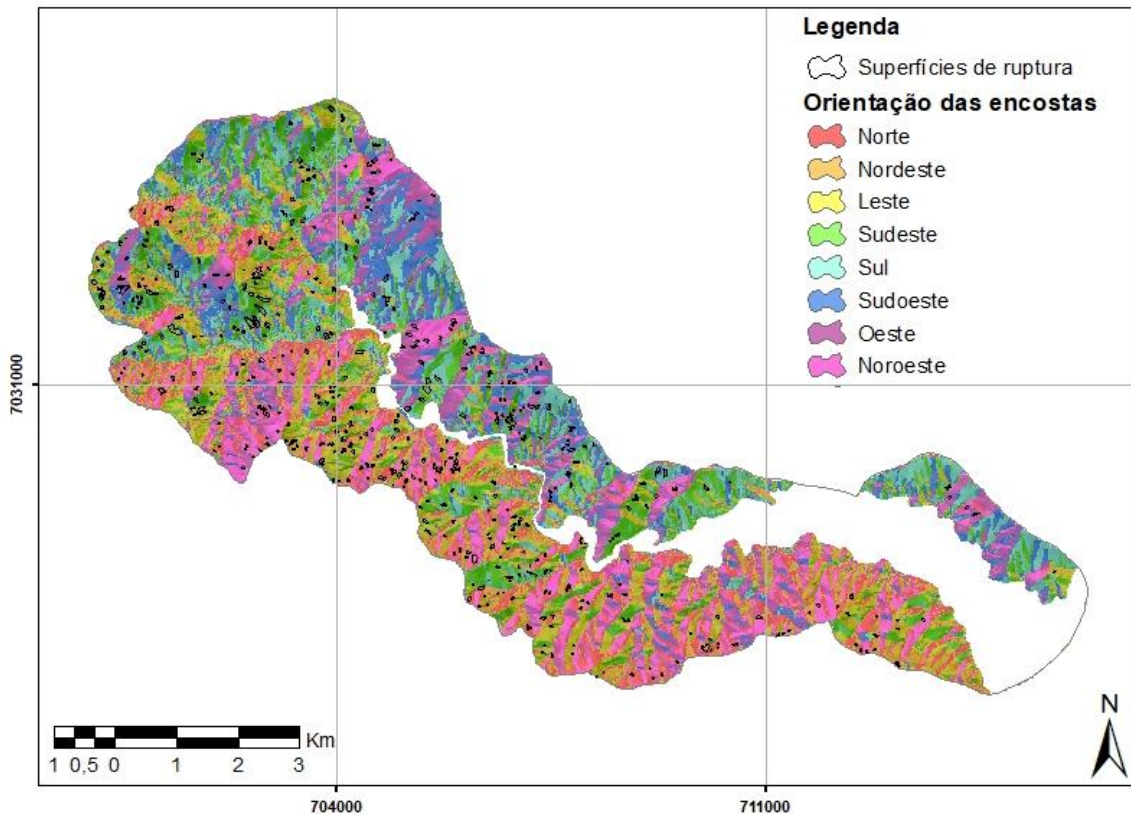
Nas Figuras 66 e 67 pode-se observar a orientação das encostas presentes na bacia do Ribeirão Baú, para as resoluções espaciais de 10 e 1m respectivamente, classificadas entre aquelas voltadas a Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste.

Figura 66 - Mapa de orientação das encostas na bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 10m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 67 - Mapa de orientação das encostas na bacia do Ribeirão Baú (*pixel 1m*).

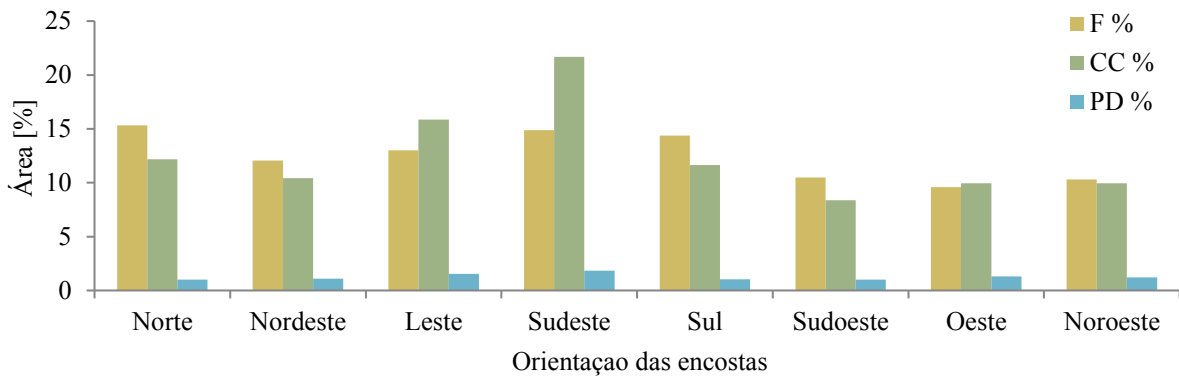


Fonte: elaborado pela Autora.

A orientação das encostas relaciona-se à variação de exposição à pluviosidade, insolação e ventos. Essa exposição ocasiona diferenças na umidade retida na vertente e, portanto, a umidade do solo. Vertentes que retêm mais umidade estão, em geral, opostas à insolação ou voltadas para a umidade transportada por ventos ou por pluviosidade. Logo, essas vertentes podem ser mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos.

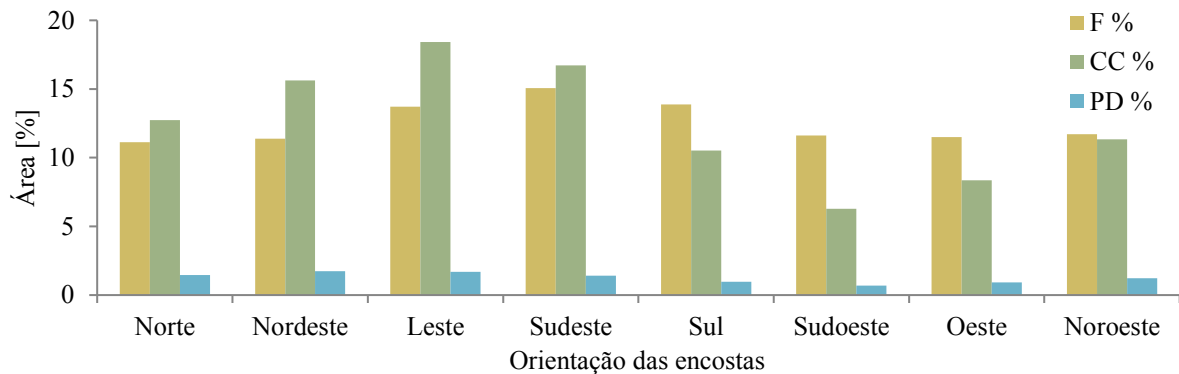
De acordo com os valores de Frequência (F) apresentados na Figura 68, observa-se que a maior parte das encostas no mapa com resolução espacial de 10m apresenta orientação Norte (15,34%), Sudeste (14,87%) e Sul (14,36%). Para os valores de Frequência (F) do mapa com resolução espacial de 1m (Figura 69), a maior parte das encostas apresenta orientação Sudeste (15,05%); as encostas com orientação Sul e Leste também ocorrem com frequência (13,88 e 13,72%, respectivamente).

Figura 68 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à orientação das encostas (resolução espacial 10m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 69 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à orientação das encostas (resolução espacial 1m).



Fonte: elaborado pela Autora.

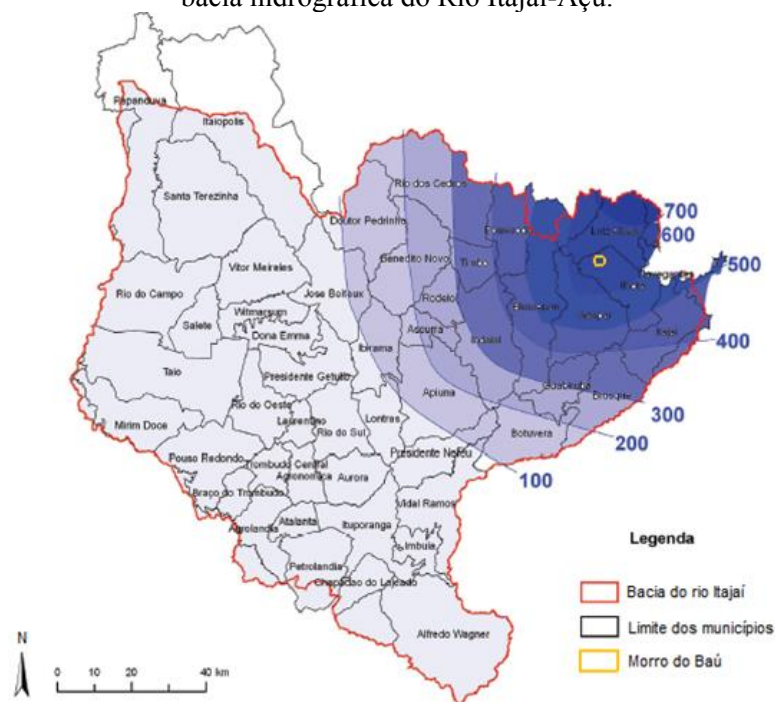
No entanto, em relação à Concentração de Cicatrizes (CC), as encostas em que ocorreu a maior parte das superfícies de ruptura de deslizamentos foram aquelas voltadas para Sudeste e Leste. Logo, essas encostas obtiveram os maiores índices de Potencial de Deslizamentos (PD): para a resolução de 10m, as voltadas para Sudeste apresentaram o maior índice (1,84%), seguidas pelas voltadas a Leste (1,54%); e para a resolução de 1m, os maiores índices foram para as voltadas a Nordeste (1,74%) e a Leste (1,70%).

Esses resultados estão diretamente relacionados às características meteorológicas do evento extremo ocorrido no mês de novembro de 2008. As elevadas precipitações foram ocasionadas pelo estabelecimento e persistência de um bloqueio atmosférico causado por um anticiclone sobre o Oceano Atlântico combinado a um sistema de baixa pressão, conhecido por vórtice ciclônico, os quais provocaram fortes ventos de leste e favoreceram o transporte de umidade do Oceano Atlântico para o continente. Esses ventos atingiram de forma praticamente

perpendicular a costa catarinense, incrementando a intensidade das precipitações orográficas (DIAS, 2009).

Os municípios que apresentaram os maiores totais pluviométricos localizam-se próximos ao litoral norte de Santa Catarina, principalmente no Vale do Itajaí. Corroborando com os resultados obtidos, a distribuição da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu caracterizou-se por ser irregular, ocorrendo um elevado gradiente a nordeste/leste e decrescendo a sudoeste/oeste, como se pode observar na Figura 70.

Figura 70 - Total acumulado de precipitação em mm entre os dias 21 e 25 de novembro de 2008 na bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu.

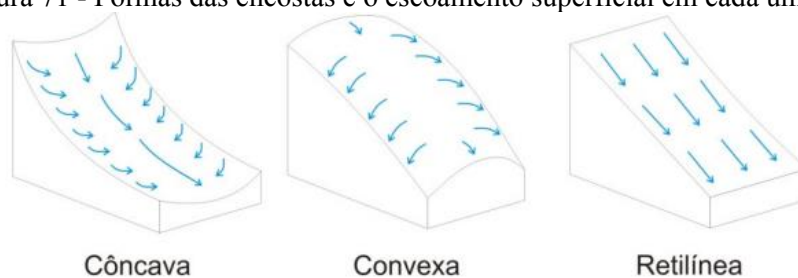


Fonte: Sbroglia (2015), adaptado de Severo (2009).

O efeito da pluviosidade nos fluxos de água superficiais e subsuperficiais está relacionado à saturação do solo e a redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, sobretudo a coesão, por eliminação da sucção, ao desenvolvimento de poropressões e ao aumento do peso do solo (WOLLE; CARVALHO, 1989). Destaca-se que o evento extremo de novembro de 2008 foi a combinação da chuva intensa de curta a média duração e chuvas precedentes, que iniciaram nos três meses anteriores, embora fracas, elas foram constantes, ocorrendo sua infiltração de forma lenta e gradativa no solo.

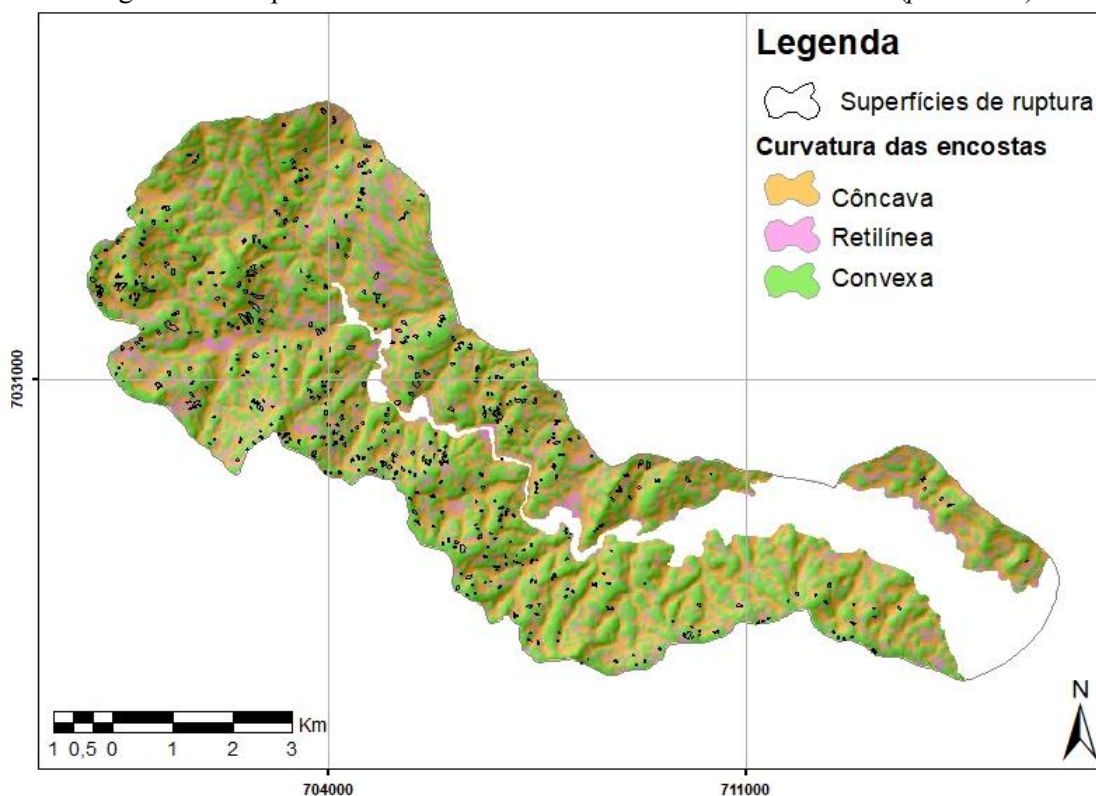
Com relação à forma das encostas, existem três tipos básicos: as côncavas, as convexas e as retilíneas. Essas formas encontram-se combinadas na natureza. A importância de analisar as rupturas de acordo com a forma das encostas refere-se à infiltração e ao escoamento das águas, bem como possíveis percursos dos movimentos de massa (Figura 71). Nas Figuras 72 e 73 é possível observar as formas das encostas da bacia do Ribeirão Baú classificadas em côncavas, retilíneas e convexas para as resoluções espaciais de 10 e 1m, respectivamente.

Figura 71 - Formas das encostas e o escoamento superficial em cada uma delas.



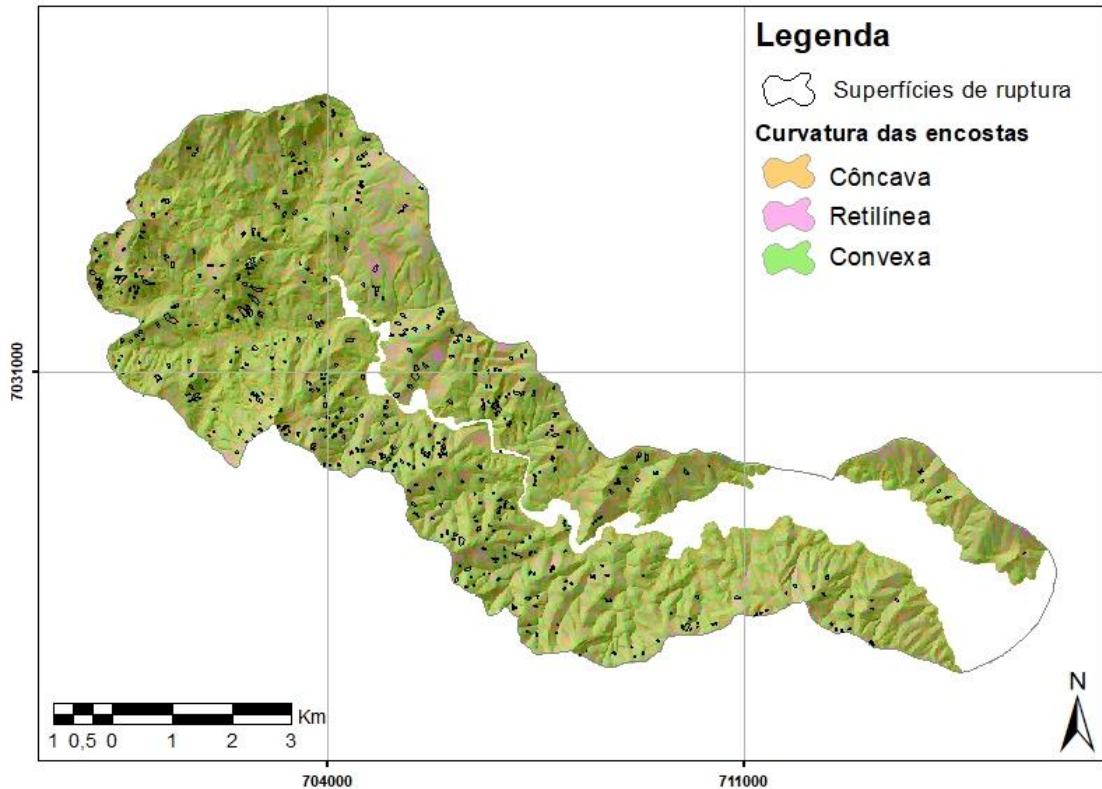
Fonte: Paula (2010).

Figura 72 - Mapa das formas das encostas na bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 10m).



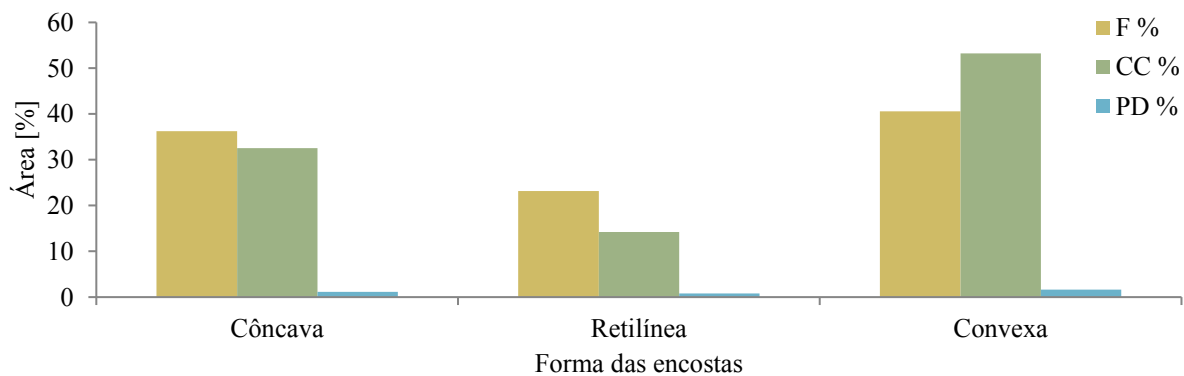
Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 73 - Mapa das formas das encostas na bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 1m).



A partir do mapa de resolução de 10m com as formas das encostas (Figura 72) e o gráfico da Figura 74, observou-se que as encostas convexas são as mais frequentes na bacia hidrográfica, com 40,60%, seguidas pelas encostas côncavas (36,25%) e retilíneas (23,15%). Nesse sentido, a Concentração de Cicatrizes (CC) e o Potencial de Deslizamento (PD) foram predominantes nas encostas com formato convexo (CC 53,22% e PD 1,65%).

Figura 74 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à forma das encostas (resolução espacial 10m).



Utilizando a mesma base cartográfica para elaboração do MDE (com resolução de 10m) e, posteriormente, o mapa de formas das encostas, Bini (2020) obteve resultados similares para o alto vale das bacias do Ribeirão Arraial do Ouro, Baú e Braço do Baú, localizadas em Gaspar e Ilhota (SC). Do total de 211 deslizamentos analisados, as formas convexas representaram 46,91%, as côncavas 27,47% e as retilíneas 26,14% dos locais onde houve rupturas. Assim como observado nesta pesquisa, para Bini (2020) os pequenos deslizamentos junto ao divisor das encostas situaram-se nos segmentos convexos, haja vista que próximo aos divisores há predominância da forma convexa. Ainda, para as rupturas situadas no meio ou base da encosta, a maior parte das cicatrizes de deslizamentos possuíam sua superfície de ruptura em formas convexas, especialmente para pequenos deslizamentos, entretanto, uma porcentagem considerável das rupturas ocorreu em segmentos côncavos da encosta.

Gerente, Bini e Luiz (2015), a partir de base cartográfica em escala 1:10.000 e 1:2.000 elaboradas anteriormente ao desastre de 2008, observaram que em função da maior frequência de segmentos convexos na bacia do Rio Saltinho, localizada em Gaspar (SC), foram nesses setores que ocorreu o maior número de movimentos de massa, sendo 27 na forma de relevo convexa, 22 na forma côncava e 8 na forma retilínea.

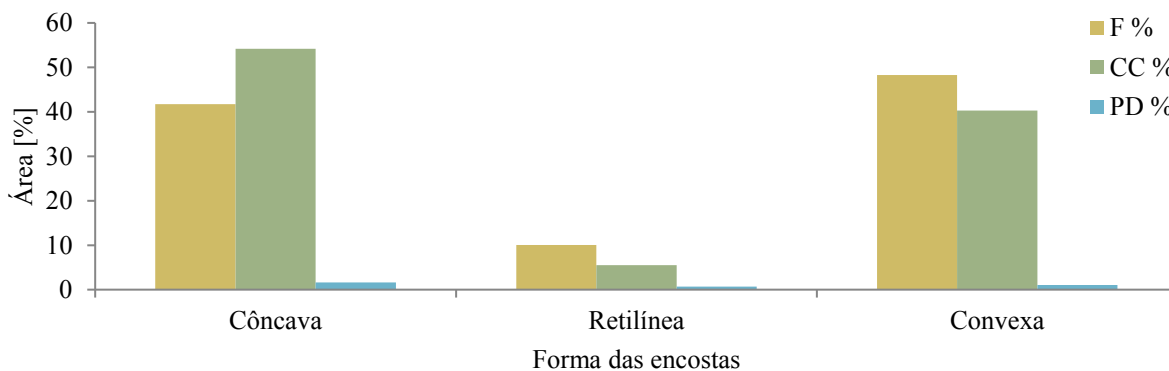
Vieira (2007), com o uso do MDE com resolução espacial de 2m elaborado a partir de cartas topográficas digitais na escala 1:10.000, da bacia de Copebrás (SP), localizada na Serra do Mar, observou predomínio das formas retilíneas (43%) e convexas (39,6%) e, em menor proporção, das côncavas (17,4%), dessa forma, em relação aos valores de PD, as encostas convexas e retilíneas obtiveram os maiores índices, 3,8% e 3,7%, respectivamente. Contudo, as formas côncavas, ocupando uma área consideravelmente menor (17,4%) apresentaram valor de PD similar aos demais (3,3%).

Outros trabalhos, ainda, identificaram as encostas retilíneas como aquelas mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, as quais proporcionem maiores velocidades de fluxo (TATIZANA *et al.*, 1987; IPT, 1991; WOLLE; CARVALHO, 1989; CETESB, 1991; LOPES, 2006; PASSARELLA *et al.*, 2008; LISTO; VIEIRA, 2010; NERY, 2011). Nesta pesquisa, nas encostas retilíneas, em declividades elevadas, foram observados os deslizamentos translacionais de pequena magnitude.

Para o mapa com resolução de 1m (Figura 73), por sua vez, e o gráfico da Figura 75, observou-se maior equilíbrio entre a Frequência (F) das encostas convexas e côncavas (com

48,26 e 41,71%, respectivamente), seguidas pelas retilíneas (com 10,03%). Entretanto, a Concentração de Cicatrizes (CC) e o Potencial de Deslizamento (PD) apresentaram valores maiores nas encostas com formato côncavo (CC 54,18% e PD 1,65%).

Figura 75 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à forma das encostas (resolução espacial 1m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Em áreas da Serra do Mar e dos maciços litorâneos, maior concentração de cicatrizes de deslizamentos em encostas côncavas também foi observada por Martins *et al.* (2017), nas bacias hidrográficas do Bom Brinquedo e das Laranjeiras, e por Dias, Dias e Vieira (2016) em Caraguatatuba (SP). Igualmente por Fernandes *et al.* (2001) nos maciços litorâneos da cidade do Rio de Janeiro, embora tenha sido registrada maior frequência das encostas convexas, o PD das encostas côncavas foi cerca de três vezes maior do que aquele associado às feições convexas e retilíneas.

As vertentes que apresentam configuração côncava ou que possuem segmentos côncavos em sua seção, por serem zonas de convergência de fluxo de água e por possuírem material disponível para a mobilização (pois têm maior volume de material depositado, como colúvio), são as mais favoráveis à ocorrência de deslizamentos de grandes proporções e corridas de detritos.

Dietrich e Montgomery (1998) afirmam que formas côncavas, por exemplo, são áreas de concentração de água e elevação mais rápida das cargas de pressão durante as chuvas, sendo mais suscetíveis a rupturas uma vez que necessitam de menor volume de água para atingirem esse limiar (RENEAU; DIETRICH, 1987; AVANZI; GIANNECCHINI; PUCCINELLI, 2004). Segundo Reneau e Dietrich (1987), nas formas convexas o fluxo é preferencialmente divergente e a água no solo aparece localmente devido a fortes chuvas ou à heterogeneidade da rocha, que

força o fluxo subsuperficial em direção ascendente para o manto de solo. Assim, essas áreas divergentes e declivosas necessitam de uma elevada ou prolongada pluviosidade para aumentar sua instabilidade.

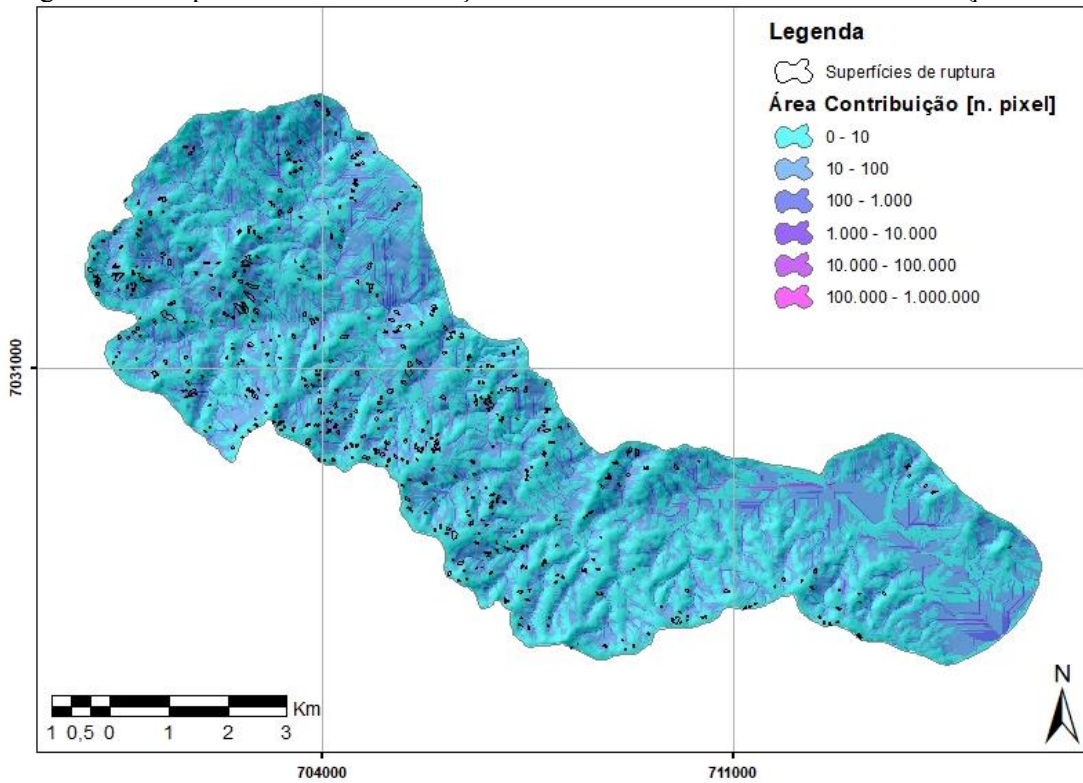
A área de contribuição ou área drenada à montante de cada célula (*pixel*) está relacionada ao valor da área correspondente à bacia de drenagem de cada célula específica. Dessa forma, a partir da área de contribuição podem-se definir os segmentos na paisagem nos quais há convergência de água, associados à concentração de fluxos superficiais e subsuperficiais e relacionados com a saturação dos solos (O'LOUGHLIN, 1986).

Nesse sentido, é possível analisar áreas suscetíveis a deslizamentos a partir da determinação da área de contribuição, sendo as áreas mais instáveis geralmente aquelas localizadas nas porções côncavas do relevo, uma vez que essas áreas são zonas potenciais de saturação (RAMOS *et al.*, 2003).

Nas Figuras 76, resolução espacial de 10m, e 77, resolução espacial de 1m, pode-se observar a contribuição das encostas presentes na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú classificadas com base no número de células (*pixels*) de que recebem o fluxo de água.

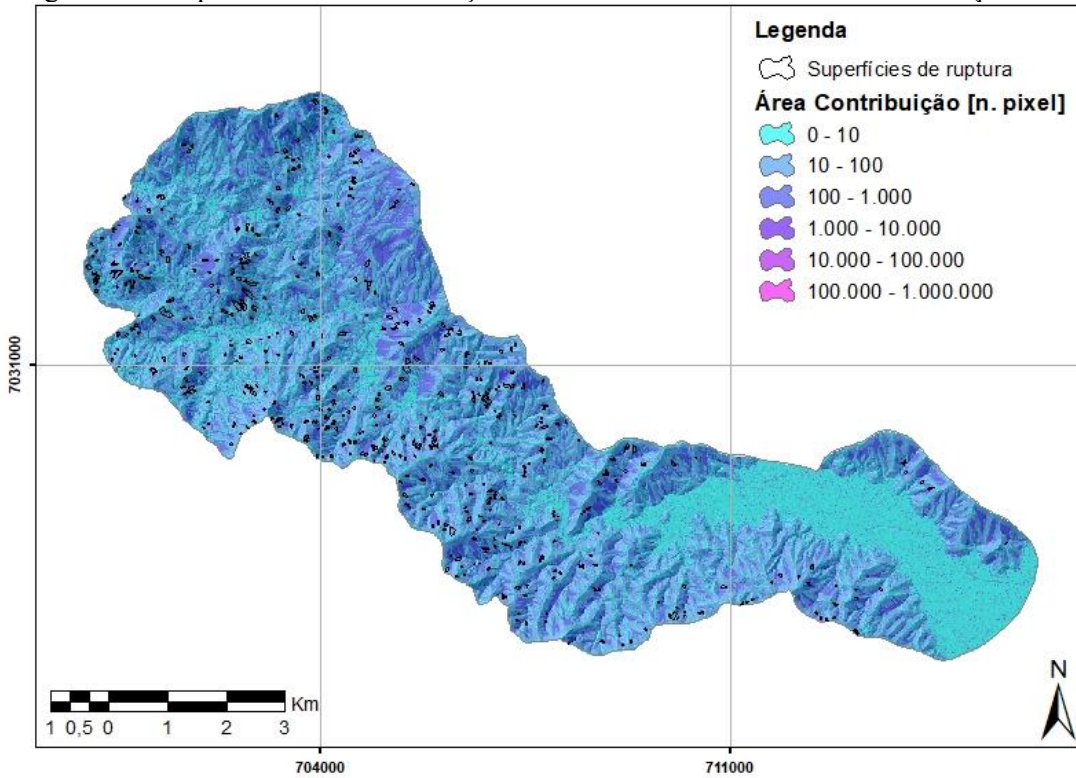
As áreas com o menor valor de contribuição (0 a 10 *pixels*) são aquelas dispersoras, ou seja, áreas com declividades elevadas e picos das encostas; e aquelas de elevada contribuição, ou seja, que recebem fluxos de água são aquelas com menores índices altimétricos da bacia hidrográfica e localizam-se nos canais de drenagem e áreas planas. Dessa forma, a área de contribuição está relacionada à forma da encosta e aos processos hidrológicos e erosivos.

Figura 76 - Mapa da área de contribuição nas encostas da bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 10m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 77 - Mapa da área de contribuição nas encostas da bacia do Ribeirão Baú (*pixel* 1m).



Fonte: adaptado de Sbroglia (2015).

Conforme os valores de Frequência (F) apresentados nas Figuras 78 (resolução espacial de 10m) e 79 (resolução espacial de 1m), pode-se observar que locais com menor área de contribuição são os mais frequentes na bacia hidrográfica. Para o mapa de resolução espacial de 10m, a contribuição de 0 a 10 *pixels* é a mais frequente (58,47%), seguida pela de 10 a 100 (36,29%). Em contrapartida, para o mapa de resolução espacial de 1m, a contribuição de 10 a 100 *pixels* é a mais frequente (53,84%), seguida por 0 a 10 (30,50%) e 100 a 1.000 (14,60%).

Figura 78 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à área de contribuição nas encostas (resolução espacial 10m).

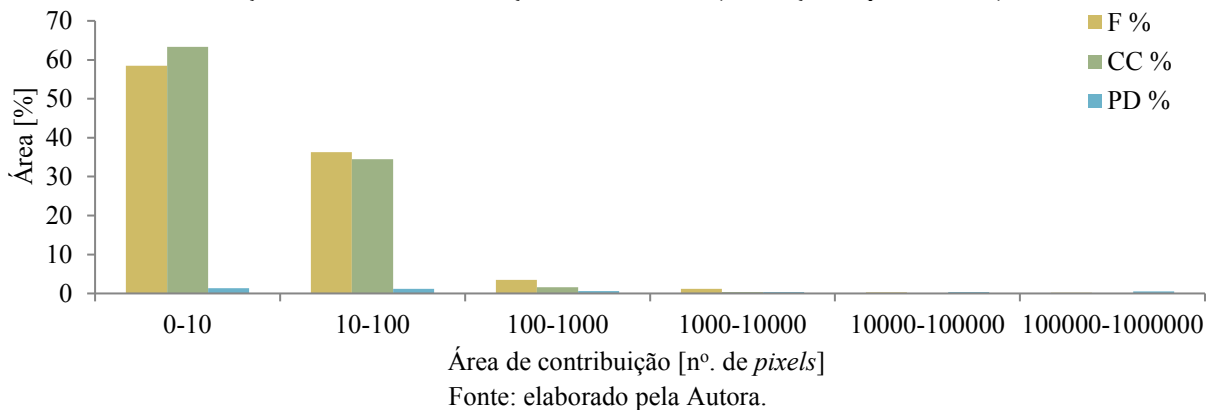
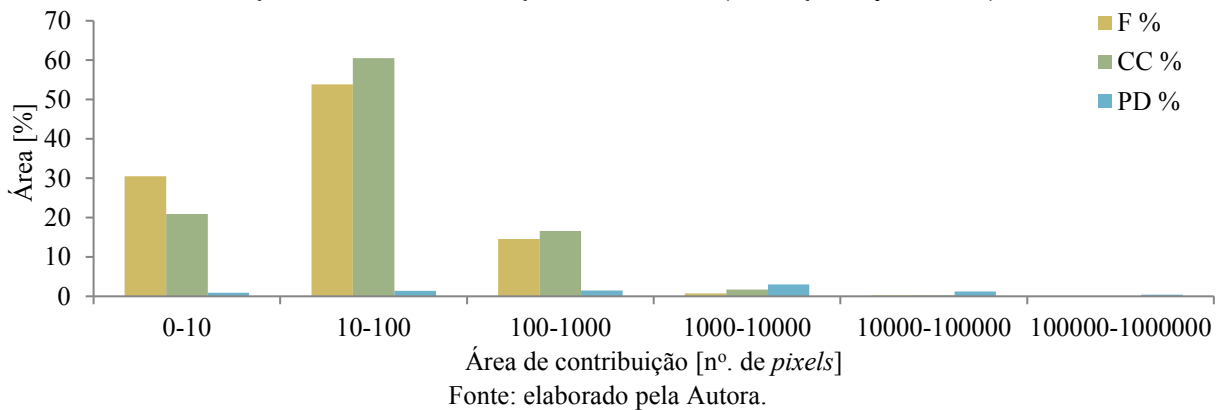


Figura 79 - Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD) em relação à área de contribuição nas encostas (resolução espacial 1m).



Para o mapa com resolução de 10m, em relação à Concentração de Cicatrizes (CC) as encostas com área de contribuição de 0 a 10 *pixels* foram as que apresentaram maior valor, de 63,36%, assim como o maior índice de Potencial de Deslizamentos (PD), de 1,37%. Para o mapa com resolução de 1m, por sua vez, em relação à Concentração de Cicatrizes (CC) as encostas com área de contribuição de 10 a 100 *pixels* foram as que apresentaram maior valor, de 60,51%. Em contrapartida, essas encostas apresentaram o terceiro maior valor de Potencial

de Deslizamentos (PD), de 1,42%. A classe que apresentou o maior valor de PD, de 3,00%, foi aquela de contribuição de 1.000 a 10.000 *pixels*. Os valores de PD, em ambas as resoluções espaciais, apresentam um limite de inversão localizado entre a classe de 0 a 10 e 10 a 100 *pixels*, sendo que a classe de menor convergência de água foi mais frequente no mapa com resolução espacial de 10m. Para essa resolução, antes desse limite, a ocorrência dos deslizamentos apresenta-se, preferencialmente, nas classes de área de contribuição menores.

Para Martins *et al.* (2017), cerca de 84 e 96% dos deslizamentos nas bacias do Bom Brinquedo e das Laranjeiras, respectivamente, ocorreram nas classes com os maiores valores de área de contribuição. Vieira (2007) observou, assim como nesta pesquisa, que as classes intermediárias (\log_{10} 1,4 a 2,1m²) foram as que apresentam maior valor de CC e PD.

Guimarães *et al.* (1998) observaram um aumento quase que linear do PD com o aumento da área de contribuição, devido os maiores valores de áreas de contribuição coincidirem com as áreas onde ocorreram deslizamentos. No entanto, os autores observaram, assim como Gomes *et al.* (2005), que as classes que apresentaram maior área de contribuição possuíram um baixo valor de PD, por serem as áreas onde estão os canais de drenagem principais localizados nas áreas de planície.

Destaca-se que, conforme os dados apresentados na resolução de 1m, os maiores valores de PD concentraram-se nas classes intermediárias, demonstrando que os deslizamentos ocorreram no terço médio das encostas da bacia hidrográfica. Segundo Vieira (2007), as duas classes extremas de área de contribuição tratam do topo e setores convexos das encostas, ou seja, áreas divergentes, e as formas côncavas, chamados *hollows*, são áreas convergentes. Essas últimas, no caso do mapa de área de contribuição, correspondem às porções mais basais das encostas, ou seja, os fundos de vales e os canais de drenagem e o seu entorno imediato.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos índices de Gao (1993), Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Deslizamentos (PD), em relação aos parâmetros morfológicos (elevação, declividade, orientação e forma das encostas, área de contribuição) a partir da distribuição das superfícies de ruptura dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008 para os mapas com resolução espacial de 10 e 1m.

Tabela 10 - Resultado da análise dos parâmetros morfológicos nas cicatrizes (*pixel* 10 e 1m).

Classes	F (%)		CC (%)		PD (%)	
	10m	1m	10m	1m	10m	1m
Altitude (metros)						
0-50	17,53	18,91	0,56	0,61	0,04	0,04
50-100	10,11	11,00	3,20	3,51	0,40	0,40
100-150	11,51	12,27	9,94	14,48	1,09	1,50
150-200	11,79	11,80	13,85	14,60	1,48	1,57
200-250	9,93	10,67	13,76	17,58	1,75	2,09
250-300	10,42	9,31	17,59	16,11	2,13	2,19
300-350	9,28	7,62	15,97	11,13	2,17	1,85
350-400	5,78	5,71	6,54	6,69	1,43	1,49
400-450	4,99	4,53	9,59	7,86	2,42	2,20
450-500	3,48	3,49	4,99	4,51	1,81	1,64
500-550	2,28	1,96	2,03	1,72	1,12	1,12
550-600	1,29	1,14	1,48	0,77	1,45	0,86
600-650	0,99	0,92	0,38	0,27	0,48	0,37
650-700	0,46	0,49	0,10	0,09	0,28	0,24
700-750	0,15	0,15	0,03	0,06	0,21	0,47
750-800	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
800-850	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Declividade (graus)						
0-5	16,16	12,79	3,81	0,19	0,30	0,02
5-10	14,98	9,43	9,32	1,51	0,78	0,20
10-15	18,83	13,41	17,39	5,07	1,16	0,48
15-20	19,02	18,95	21,92	12,81	1,45	0,86
20-25	15,39	20,51	22,07	25,28	1,81	1,56
25-30	9,78	14,23	15,14	26,11	1,95	2,33
30-35	4,38	6,82	7,54	16,47	2,17	3,06
35-40	1,14	2,62	2,29	8,19	2,54	3,96
40-45	0,26	0,84	0,48	2,96	2,38	4,49
>45	0,06	0,39	0,04	1,42	0,74	4,57
Orientação da encosta						
Norte	15,34	11,12	12,16	12,74	1,00	1,45
Nordeste	12,04	11,39	10,42	15,64	1,09	1,74
Leste	13,02	13,72	15,85	18,42	1,54	1,70
Sudeste	14,87	15,05	21,69	16,71	1,84	1,41
Sul	14,36	13,88	11,64	10,51	1,02	0,96
Sudoeste	10,49	11,63	8,37	6,28	1,01	0,68
Oeste	9,58	11,51	9,94	8,37	1,31	0,92
Noroeste	10,30	11,71	9,94	11,33	1,22	1,23
Forma da encosta						
Côncava	36,25	41,71	32,55	54,18	1,13	1,65
Retilínea	23,15	10,03	14,23	5,51	0,77	0,70
Convexa	40,60	48,26	53,22	40,31	1,65	1,06
Área de Contribuição						
0-10 ¹	58,47	30,50	63,36	20,88	1,37	0,87
10 ¹ -10 ²	36,29	53,84	34,46	60,51	1,20	1,42
10 ² -10 ³	3,52	14,60	1,63	16,58	0,59	1,44
10 ³ -10 ⁴	1,20	0,74	0,37	1,76	0,39	3,00
10 ⁴ -10 ⁵	0,30	0,26	0,08	0,25	0,32	1,25
10 ⁵ -10 ⁶	0,23	0,07	0,10	0,02	0,56	0,38

Fonte: elaborado pela Autora.

5.1.1 Influência da escala nos parâmetros morfológicos das encostas em relação às cicatrizes de deslizamentos

Foi realizada uma análise da influência da escala dos produtos cartográficos utilizados na elaboração dos mapas morfológicos. Apesar do maior detalhamento nos mapas com resolução espacial de 1m (escala 1:10.000) em detrimento daqueles com resolução espacial de 10m (escala 1:50.000), deve-se considerar que este é anterior ao desastre natural ocorrido em novembro de 2008. Dessa forma, quando realizada a sobreposição das cicatrizes dos deslizamentos ocorridos naquela data, observaram-se diferenças significativas nos resultados, sobretudo em relação à declividade, à área de contribuição e à forma das encostas.

No mapa de declividade das encostas elaborado a partir do MDE com resolução espacial de 10m, foi possível observar maior Frequência dos valores mais baixos, ou seja, relevos suavizados, a qual refletiu na Concentração de Cicatrizes em declividades intermediárias, de 15 a 25°. Observou-se, ainda, que a faixa de declividade com maior Potencial de Deslizamentos variou entre as resoluções espaciais analisadas, enquanto que no mapa de menor resolução o PD foi maior nas declividades de 30 a 45°, na escala de maior detalhe os maiores valores de PD foram nas encostas acima de 40°. Pode-se inferir, dessa forma, alteração na geometria das encostas que ocorreram movimentos de massa e, em alguns casos, com a elevação da declividade no interior das cicatrizes dos deslizamentos.

Em relação à área de contribuição observou-se maior Frequência, Concentração de Cicatrizes e Potencial de Deslizamentos na classe de menor contribuição (0 a 10 *pixels*) para a escala de 1:50.000, em relação a de maior detalhe, dessa forma, observa-se que quanto menor a resolução, mais suavizada é a representação do relevo e, conseqüentemente, menor é a convergência topográfica (DIETRICH; BELLUGI; ASUA, 2001). Nesse sentido, conforme também observado por Gomes *et al.* (2005), no mapa de resolução espacial de 10m não foi possível discretizar as nuances do relevo adequadamente quando comparado ao mapa de 1:10.000.

Nesse sentido, foram observadas diferenças mais significativas em relação à forma das encostas nas cicatrizes antes e após novembro de 2008. Apesar de ambos os mapas apresentarem maior Frequência das encostas convexas, de 40,60 e 48,26% nas resoluções de 10 e 1m, respectivamente, a Concentração de Cicatrizes foi consideravelmente maior nas

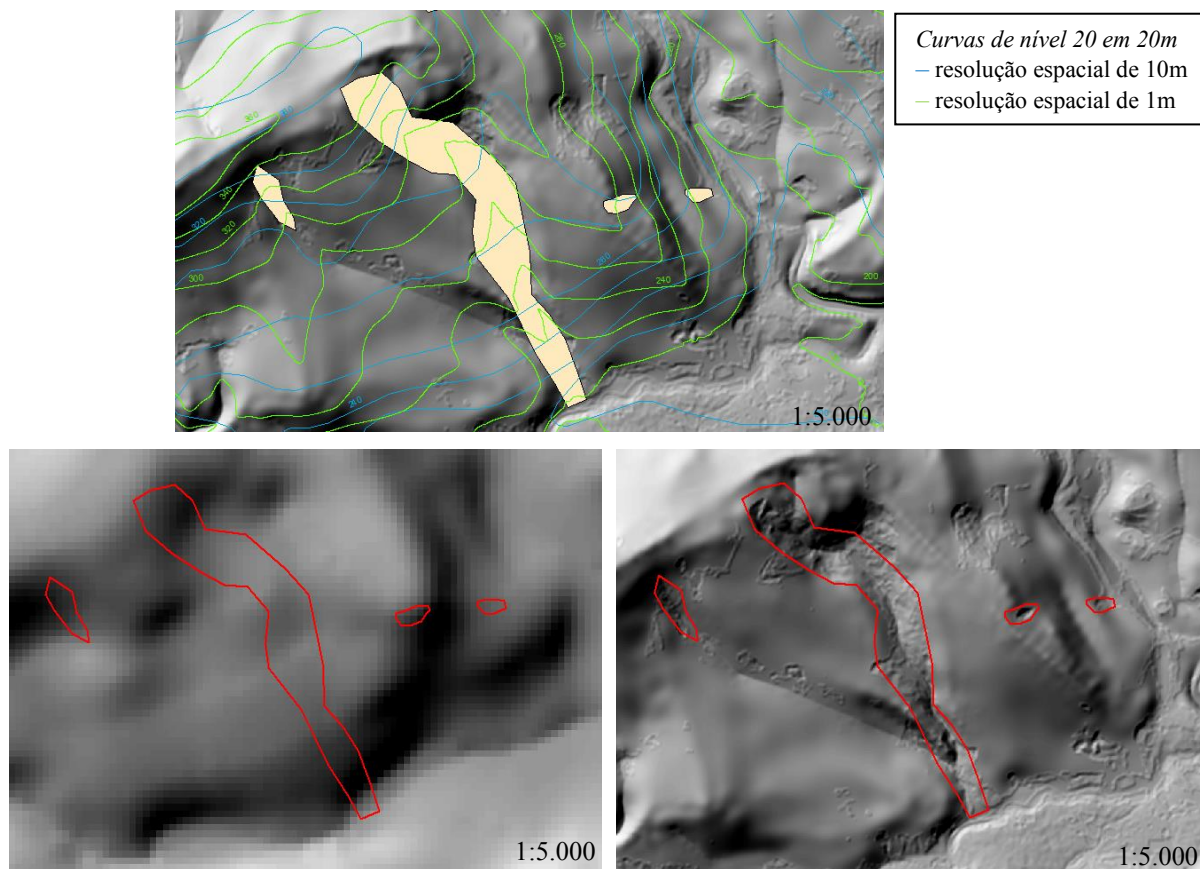
encostas côncavas do mapa de maior resolução espacial (1m). Enquanto o maior valor de CC e de PD foi nas encostas convexas do mapa com resolução de 10m, no mapa com resolução de 1m foi nas encostas côncavas.

Nesse sentido, observa-se que, anteriormente ao desastre, a forma predominante de relevo nas superfícies de ruptura era convexa. Embora ocorra divergência do fluxo de água nesse tipo de encosta, devido ao elevado índice pluviométrico ocorrido no mês de novembro de 2008, especialmente nos dias 22 e 23, ocorreu a saturação generalizada da encosta, a qual reduziu consideravelmente as tensões efetivas no solo e provocou os movimentos de massa.

A partir da comparação entre os mapas de relevo sombreado e curvas de nível obtidos por meio do MDE com escala 1:50.000 (resolução espacial de 10m) e 1:10.000 (resolução espacial de 1m), foi possível observar as feições deixadas na paisagem após a ocorrência do desastre de novembro de 2008, e constatar, para a maior parte das cicatrizes mapeadas, alterações significativas na geometria das encostas.

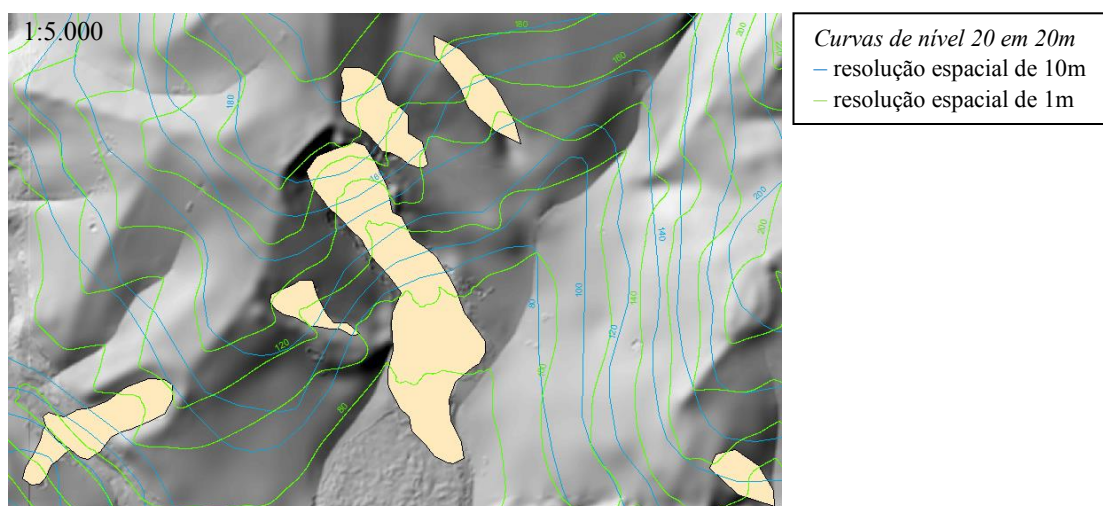
Sobreira e Souza (2012) afirmam que, em escalas menores que 1:25.000, não há precisão gráfica para a elaboração de MDE, uma vez que pequenas feições do terreno podem ser generalizadas a nível de ponto, ocasionando certo grau de incerteza na produção de informações derivadas, como os parâmetros morfológicos. Embora o relevo sombreado obtido do levantamento mais preciso (*pixel* de 1m) apresente maior detalhamento das feições, observou-se alterações no formato das curvas de nível no interior das cicatrizes dos deslizamentos e na forma das encostas após o desastre natural. As Figuras 80 e 81 apresentam cicatrizes de deslizamentos representativas em que ocorrem essas alterações, localizadas na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

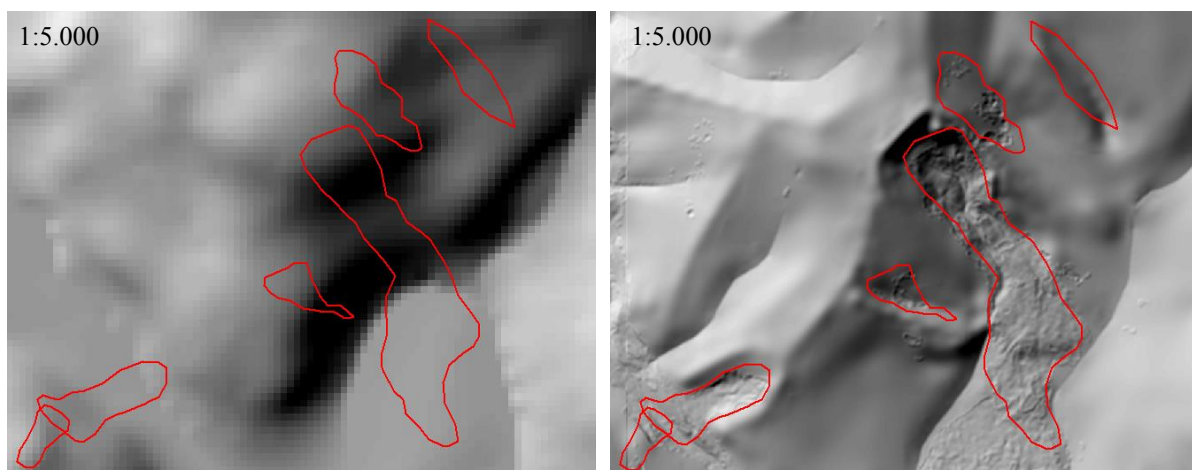
Figura 80 - Cicatrizes de deslizamentos nas resoluções espaciais de 10 e 1m.



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 81 - Cicatrizes de deslizamentos nas resoluções espaciais de 10 e 1m.





Fonte: elaborado pela Autora.

De modo geral, nas zonas de ruptura e de passagem dos sedimentos rompidos, setores convexos ou retilíneos alteraram-se para côncavos, demonstrando que o material deslizado escavou o terreno. Na zona de deposição dos deslizamentos de maior magnitude, situada na base das encostas, por sua vez, em alguns casos ocorreu mudança da forma côncava para convexa devido à acumulação de materiais depositados.

Nesse contexto, a comparação das formas das encostas em produtos cartográficos originados de datas anteriores e posteriores à ocorrência de movimentos de massa pode servir como subsídio na análise de condicionantes e mecanismos do processo, e, nesta pesquisa auxiliou, ainda, na classificação estimada da tipologia dos deslizamentos.

Apesar da importância dos parâmetros morfológicos na análise de estabilidade das encostas, observa-se que a resolução espacial do levantamento topográfico e o fato de ele ser elaborado anteriormente a ocorrência de deslizamentos são determinantes nos resultados. Dessa forma, em relação à escala, apesar da base cartográfica disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE não ser mais apropriada, sobretudo para uso em modelagens matemáticas, destaca-se a importância de também utilizá-la nesta pesquisa devido às modificações constatadas na geometria das encostas deslizadas no MDE disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina - SDE/SC.

Por fim, as análises dos índices de Gao (1993) demonstraram que as classes de maior frequência na área não são necessariamente aquelas que apresentam os maiores Potenciais de Deslizamentos. A partir dessa análise, pôde-se verificar que os parâmetros morfológicos são determinantes na localização espacial dos deslizamentos, no entanto, não são unicamente

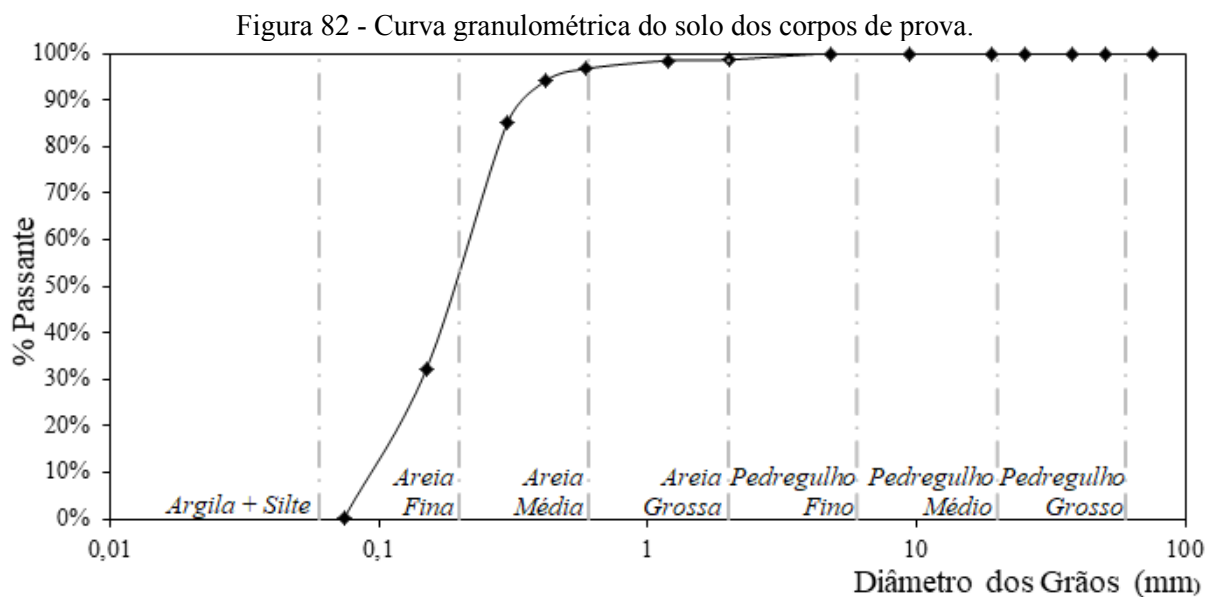
responsáveis pela ocorrência desses processos. Dessa forma, entende-se que em estudos de estabilidade de encostas, a análise dos parâmetros morfológicos não deve ser realizada isoladamente, mas em conjunto com as outras variáveis, como os parâmetros geotécnicos dos solos.

5.2 VALIDAÇÃO DO ENSAIO *BOREHOLE SHEAR TEST* EM LABORATÓRIO

A validação do ensaio *Borehole Shear Test* (BST) foi realizada por meio da comparação dos resultados de ensaios mais conhecidos e conceituados na determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, executados em laboratório e em corpos de prova com as mesmas características. Parte dos resultados, em relação à execução e comparação do ensaio BST com o Cisalhamento Direto, encontra-se publicada por Domingues *et al.* (2019).

5.2.1 Características geotécnicas dos corpos de prova

Com o intuito de analisar a distribuição das dimensões dos grãos no solo, foi realizado o ensaio de granulometria do material utilizado para confeccionar os corpos de prova. Os resultados foram apresentados graficamente pela curva granulométrica da Figura 82, na qual o eixo das abscissas corresponde ao tamanho dos grãos em escala logarítmica e o eixo das ordenadas à percentagem do material passante.



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

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de uma mistura compactada de areia fina, cal e água (em uma proporção de 10:1,5:1,5, respectivamente). A escolha da areia para a execução dos ensaios se deu devido suas características geotécnicas serem dependentes apenas do embricamento entre os grãos, assim, é possível fabricar corpos de prova idênticos e, sobretudo, atingir a condição consolidada e drenada durante a execução dos ensaios. Na Tabela 11 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do solo confeccionado para os corpos de prova.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de caracterização do solo dos corpos de prova.

Dados de caracterização do solo		
	<i>Argila e Silte</i>	0,13
Granulometria [%]	<i>Areia Fina</i>	94,05
	<i>Areia Média</i>	4,48
	<i>Areia Grossa</i>	1,35
	<i>Pedregulho</i>	0,00
	Teor de umidade [%]*	12,12
Massa específica δ	2,65	
Peso específico natural (γ_{nat}) [kN/m ³]*	16,80	
Peso específico saturado (γ_{sat}) [kN/m ³]*	19,25	
Peso específico submerso (γ') [kN/m ³]*	9,25	
Peso específico seco (γ_d) [kN/m ³]	14,94	
Índice de vazios	1,001	
Classificação SUCS	SP	

*Média dos valores obtidos de 4 corpos de prova do ensaio de Cisalhamento Direto.

Fonte: adaptado de Domingues *et al.* (2019).

De acordo com os resultados dos ensaios e a curva granulométrica, observou-se que o solo é mal graduado, predominantemente composto por areia (99,9%). Entre as dimensões da areia, há maior porcentagem de areia fina (94%). Dessa forma, o solo é classificado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) com a sigla SP, ou seja, areia mal graduada com pouco ou nenhum fino (argila e silte).

Definiu-se o teor de umidade em porcentagem como sendo a relação entre o peso da água e o peso das partículas sólidas contidos num certo volume de solo, nesse sentido, a média do teor de umidade nos corpos de prova do ensaio de Cisalhamento Direto foi de aproximadamente 12,12% e do ensaio de Compressão Triaxial foi de 11,54%, variação considerada adequada para a execução dos ensaios.

A massa específica dos sólidos (δ), que é a razão entre o peso específico da fase sólida

e o peso específico da água, foi de 2,65. De acordo com Caputo (1975) e Das (2007), apesar de normalmente situarem-se em torno de 2,70, os valores de δ podem variar, solos arenosos com grãos de quartzo, como é o caso do solo analisado, costumam apresentar valores de 2,65, solos argilosos e siltosos entre 2,60 e 2,90, solos orgânicos apresentam valores menores que 2,50 e argilas lateríticas, em virtude da deposição de óxidos de ferro, valores em torno de 3,00.

A média do peso específico natural (γ_{nat}) dos corpos de prova no ensaio de Cisalhamento Direto foi de 16,80kN/m³. A magnitude do peso específico natural, calculado pela relação entre o peso total do solo e o seu volume total, depende da quantidade de água nos vazios e dos grãos minerais predominantes, e é utilizado no cálculo de esforços. A média dos valores do peso específico aparente seco (γ_d), por sua vez, obtido a partir da relação entre o peso dos sólidos e o volume total, foi de 14,94kN/m³, o γ_d é empregado para verificar o grau de compactação. O valor do índice de vazios calculado para o material foi de 1,001.

A partir de correlação entre os índices físicos, foi possível calcular o peso específico saturado (γ_{sat}) e submerso (γ') do corpo de prova, de 19,25kN/m³ e 9,25kN/m³, respectivamente. Este está relacionado à camada de solo localizada abaixo do nível freático, e é igual ao peso específico natural menos o peso específico da água, e aquele é a relação entre o peso total e o volume total calculados com base nos dados do ensaio de Cisalhamento Direto, para a condição de grau de saturação igual a 100%.

5.2.2 Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto, Compressão Triaxial e *Borehole Shear Test*

A partir dos corpos de prova confeccionados com as mesmas características, foram realizados em laboratório os ensaios de Cisalhamento Direto, Compressão Triaxial e *Borehole Shear Test*. A partir dos valores de tensão normal (σ) por tensão cisalhante (τ) em cada ensaio, foram geradas as envoltórias pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, as quais fornecem os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo ensaiado.

Dessa forma, a Tabela 12 apresenta os valores das tensões normais aplicadas e as tensões cisalhantes máximas correspondentes para cada estágio dos três ensaios.

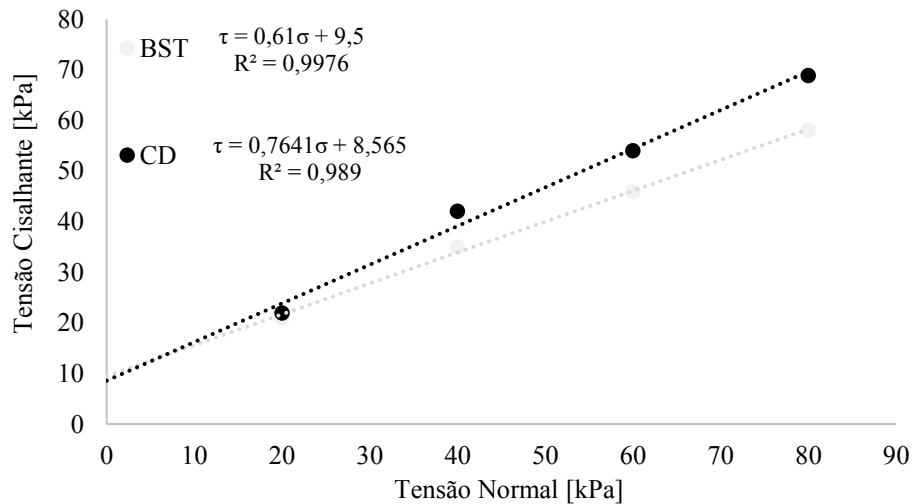
Tabela 12 - Tensões normal e cisalhante nos ensaios.

Ensaio	Tensão normal	Tensão cisalhante
	[kPa]	[kPa]
<i>Borehole Shear Test</i>	20	21
	40	35
	60	46
	80	58
Cisalhamento Direto	20	22
	40	42
	60	54
	80	69
Compressão Triaxial	20 / $p - 128$	$q - 95$
	40 / $p - 277$	$q - 237$
	80 / $p - 440$	$q - 333$

Fonte: adaptado de Domingues *et al.* (2019).

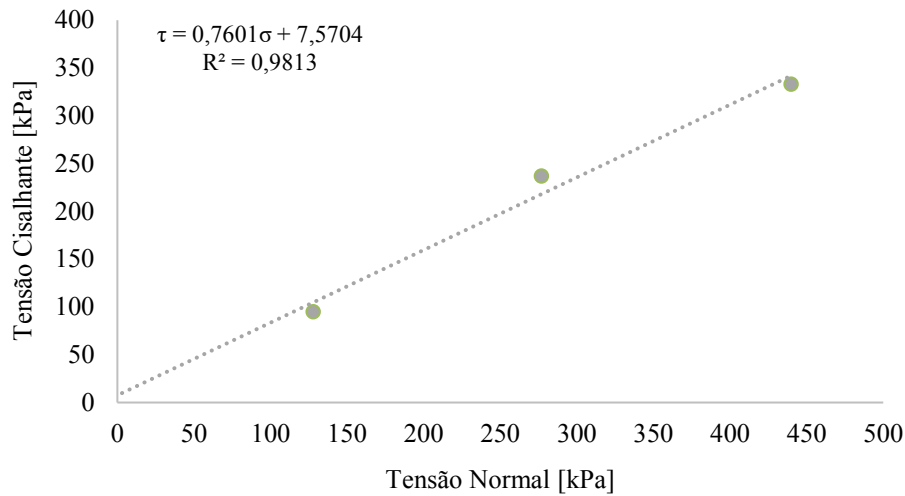
A partir das tensões normais (σ) e cisalhantes (τ) em cada estágio dos ensaios de *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial, foram elaborados os gráficos das Figuras 83 e 84, nos quais se pode observar as envoltórias de ruptura cujas equações são: $\tau = 0,61\sigma + 9,5$, $\tau = 0,76\sigma + 8,6$ e $\tau = 0,76\sigma + 7,6$, respectivamente.

Figura 83 - Gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal dos ensaios BST e CD - condição consolidada drenada.



Fonte: adaptado de Domingues *et al.* (2019).

Figura 84 - Gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal para o ensaio de Compressão Triaxial - condição consolidada drenada.



Fonte: elaborado pela Autora.

A partir das Figuras 83 e 84, observa-se a similaridade entre os resultados obtidos e correlações satisfatórias entre as envoltórias de ruptura. O coeficiente de determinação (r^2) para os ensaios foi próximo da unidade, o que indica a linearidade dos resultados.

Por meio das envoltórias de ruptura obtidas em cada ensaio foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, intercepto de coesão e ângulo de atrito, apresentados na Tabela 13. A coesão ocorre pela cimentação ou atração físico-química entre partículas de solo e o atrito interno corresponde à força desenvolvida quando se verifica tendência ao movimento.

Tabela 13 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos do corpo de prova obtidos pelos ensaios de *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial.

Ensaio	Intercepto coesivo [kPa]	Ângulo de atrito [graus]
<i>Borehole Shear Test</i>	9,5	31,4
Cisalhamento Direto	8,6	37,4
Compressão Triaxial	7,6	36,6

Fonte: adaptado de Domingues *et al.* (2019).

Os valores dos parâmetros de resistência apresentaram-se próximos, entretanto, nota-se variação mais significativa entre os resultados do ensaio de Cisalhamento Direto e BST para o ângulo de atrito (ϕ). A variação no valor de ϕ entre os ensaios foi de 6° . Para os valores de

intercepto coesivo, a maior variação foi entre os ensaios de Compressão Triaxial e BST, de 1,9kPa.

Os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos pelo ensaio BST para do solo confeccionado em laboratório foi ligeiramente menor em relação aos ensaios de Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial. Entretanto, as variações apresentadas neste estudo, em comparação com os resultados obtidos por Contessi (2016), Sakamoto *et al.* (2016) e Sbroglia *et al.* (2018a), foram consideradas satisfatórias.

Uma análise mais aprofundada pode ser realizada comparando os resultados obtidos por Contessi (2016), pois, assim como nesta pesquisa, os corpos de prova foram confeccionados em laboratório (a partir da homogeneização de um solo residual coletado em uma superfície de ruptura de deslizamento ocorrido em 2008 em Florianópolis) e o ensaio de campo *Borehole Shear Test* foi executado em laboratório. No entanto, diferentemente dos resultados obtidos neste trabalho, para os ensaios realizados na condição natural, a maior variação se deu entre os valores de intercepto de coesão, de 8,3kPa, enquanto para o parâmetro ângulo de atrito a variação foi de apenas 1,6°.

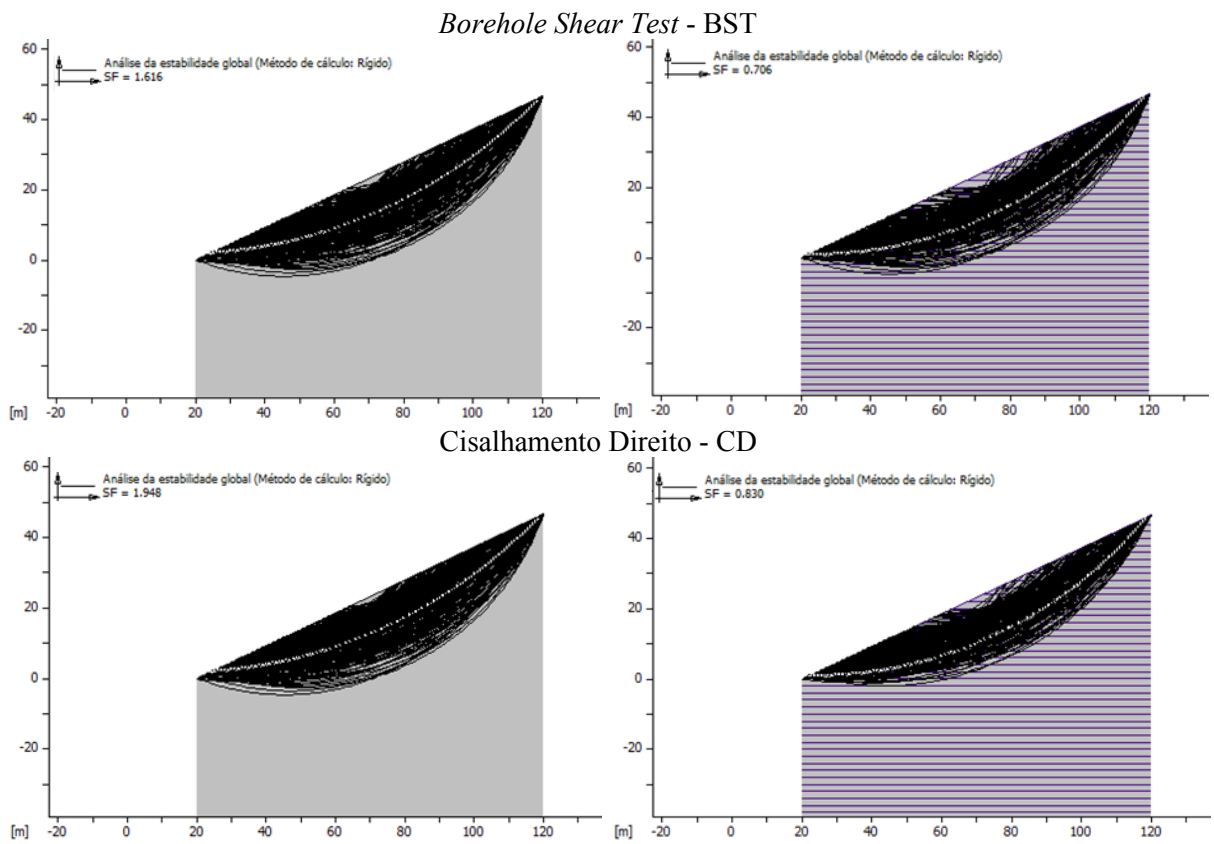
Lutenegger e Hallberg (1981) relatam que, em muitos casos, os resultados do ensaio BST se equiparam aos resultados dos ensaios de laboratório, sobretudo quando executados em corpos de prova consolidados drenados. Nesse sentido, pode-se concluir que, nesta pesquisa, as envoltórias de ruptura nos corpos de prova fabricados em laboratório, submetidos a iguais condições de drenagem e tensões normais (20, 40, 60 e 80kPa), apresentaram correlações consideradas satisfatórias e, como resultado, obtiveram-se valores de parâmetros de resistência semelhantes.

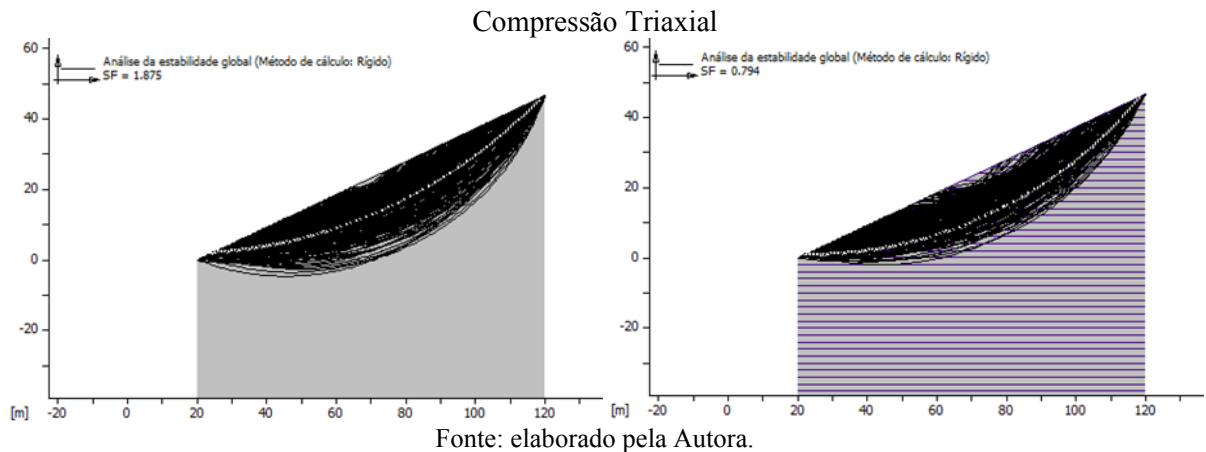
Complementarmente, foi calculado o Fator de Segurança (FS) para um talude genérico retilíneo com 25° de inclinação. O FS é obtido pela razão entre a soma dos esforços resistentes ao movimento de massa e cisalhantes. A ruptura de um talude ocorre quando os esforços solicitantes excedem a resistência, resultado do FS menor que 1.

Dessa forma, a partir de um *software* de estabilidade de encostas, calculou-se o FS por meio do método de Bishop (1955), o qual analisa as superfícies potenciais de ruptura circular com base no método das fatias. Em relação às propriedades do solo, utilizou-se os valores de peso específico natural, 16,80kN/m³, e saturado, 19,25kN/m³, do solo do corpo de prova e os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito obtidos em cada um dos ensaios (Tabela 13).

Na Figura 85, podem-se observar as superfícies de ruptura rotacionais traçadas em taludes secos e totalmente saturados. No talude totalmente saturado, considerou-se no cálculo do FS o peso específico saturado (γ_{sat}). A elevação do nível d'água em massas homogêneas de solo produz um acréscimo da pressão da água nos poros (pressão neutra), as quais reduzem os esforços resistentes, podendo, assim, levar o talude à ruptura.

Figura 85 - Superfícies de ruptura traçadas para um talude retilíneo seco (a esquerda) e saturado (a direita) e o valor do Fator de Segurança.





Na Tabela 14 são apresentados os valores de Fator de Segurança (FS) calculados para cada tipo de ensaio. Observa-se que, para o talude totalmente saturado, os resultados de FS apresentaram-se abaixo de 1, assim, sob essa condição ocorreria a ruptura do solo, enquanto que, para o talude seco, todos os valores foram superiores a 1,5.

Tabela 14 - Valores de Fator de Segurança calculado com os parâmetros obtidos pelos ensaios de *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial.

Ensaio	Talude seco	Talude saturado
<i>Borehole Shear Test</i>	1,616	0,706
Cisalhamento Direto	1,948	0,830
Compressão Triaxial	1,875	0,794

Fonte: elaborado pela Autora.

Foi possível observar, ainda, que o ensaio CD apresentou, para ambos os taludes, os maiores valores de FS, enquanto o ensaio BST apresentou os menores, embora neste ensaio foi obtido o maior valor de intercepto coesivo e menor valor de ângulo de atrito. Isso demonstra a elevada sensibilidade do *software* ao parâmetro ângulo de atrito, pois o ensaio CD apresentou o maior valor para esse parâmetro, e o ensaio BST o menor; e que os dados obtidos do BST geram um FS mais a favor da segurança.

De forma geral, observou-se que o ensaio BST apresenta-se como uma importante alternativa quando se almeja obter parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos de forma eficiente e com maior abrangência do terreno pesquisado e, assim, realizar uma caracterização do solo de forma mais precisa. Nesse contexto, a partir dos resultados obtidos e à luz da comparação entre a execução dos três ensaios apresentada na Fundamentação Teórica deste

trabalho, entende-se como vantajoso o uso do *Borehole Shear Test*, principalmente em relação às características elencadas a seguir:

- Ensaio realizado *in situ*, dessa forma, não necessita coleta nem transporte do corpo de prova, que podem gerar mais perturbação à amostra de solo;
- Fácil portabilidade do equipamento BST e não requer fonte de energia elétrica para execução do ensaio;
- Execução do ensaio de simples compreensão e não requer experiência do operador;
- O tempo de execução do ensaio, em média de 2 horas, é substancialmente menor em comparação aos ensaios de laboratório, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial;
- O ensaio pode ser realizado em qualquer horizonte do solo e as camadas podem ser inspecionadas durante a tradagem, sendo possível a coleta de amostras deformadas para caracterização do solo em laboratório;
- O ensaio pode ser executado em qualquer direção, desde que possa ser feito um furo no solo, dessa forma, recomenda-se sua utilização em análises de estabilidade de taludes, pois pode ser executado diretamente na superfície de ruptura;
- Concomitantemente a execução dos estágios do ensaio é elaborado o gráfico de tensão normal *versus* tensão cisalhante, logo, os valores obtidos podem ser analisados em campo, permitindo ao operador avaliar a necessidade da execução de novos estágios ou substituição de valores a serem plotados no gráfico em algum dos estágios já executados.

Deve-se citar que, na execução do ensaio BST, não são fornecidos dados das deformações horizontais e verticais nem os valores de variação da pressão neutra. Contudo, é possível coletar corpo de prova indeformado para que sejam obtidos os índices físicos em laboratório, como o índice de vazios e o peso específico natural, os quais podem ser necessários a determinada pesquisa.

Por fim, observa-se que são aceitáveis possíveis variações nos resultados decorrentes dos procedimentos dos ensaios, principalmente no ensaio BST, em que a velocidade de ruptura é realizada manualmente. Ressalta-se que os resultados obtidos a partir dos ensaios de Cisalhamento Direto e BST são menos precisos quando comparados aos resultados do ensaio de Compressão Triaxial, contudo, são considerados aplicáveis no mapeamento geotécnico, dada sua menor complexidade.

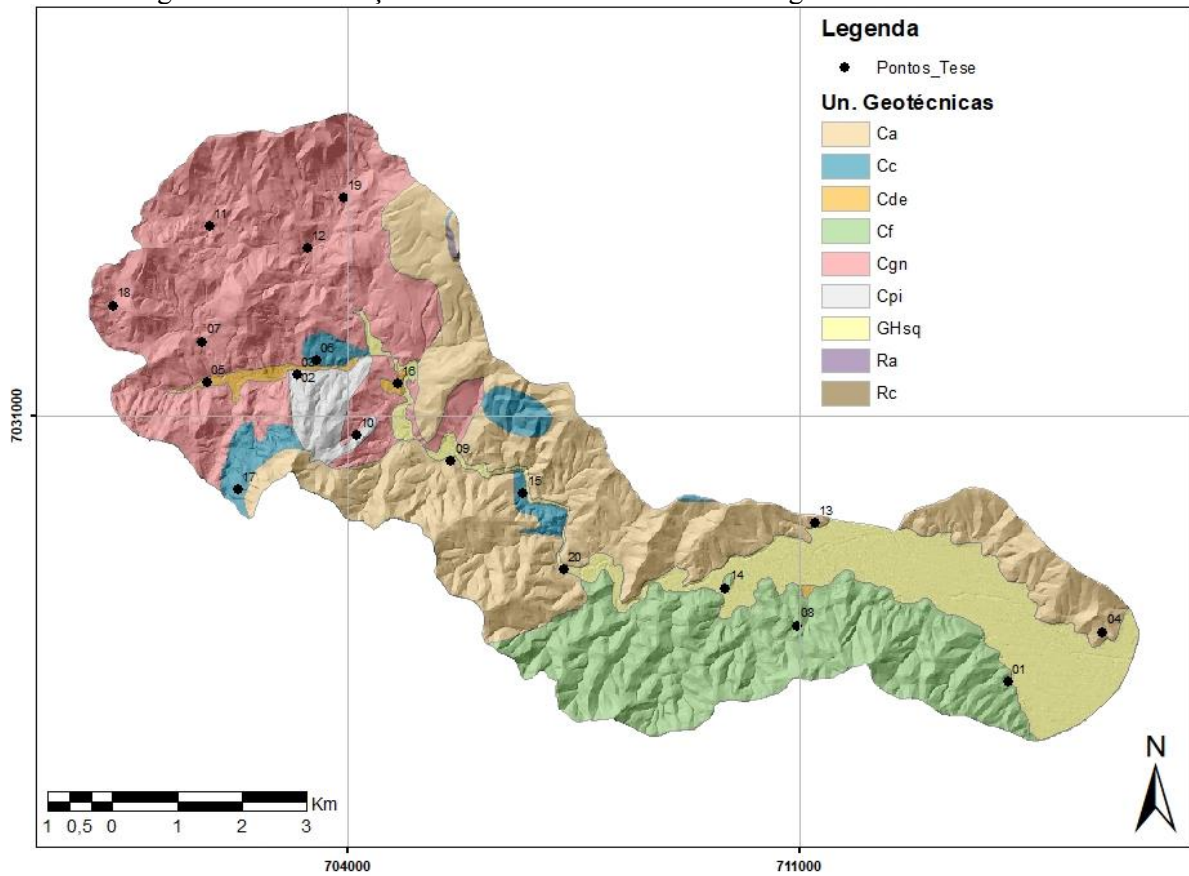
Ante o exposto, recomenda-se o uso do equipamento BST para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, por se tratar de um equipamento de fácil portabilidade e um ensaio de fácil e rápida execução. Dessa forma, quando associado ao mapeamento geotécnico é possível obter dados com baixa variabilidade e abrangendo uma maior área em menor tempo, sendo possível atribuir valor numérico aos parâmetros de resistência dos solos para as áreas consideradas mais homogêneas quanto a suas características geotécnicas, em relação às adjacentes, e mantendo, ainda, a confiabilidade dos dados obtidos com precisão semelhante aos ensaios mais difundidos e comumente utilizados, como o Cisalhamento Direto.

5.3 ENSAIOS *BOREHOLE SHEAR TEST* EM CAMPO

Foram executados ensaios *Borehole Shear Test* (BST) na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. Os ensaios foram realizados com o furo inundado, simulando a condição mais desfavorável e possivelmente aquela que ocorreu no momento dos deslizamentos em novembro de 2008. Ressalta-se que a presença de água, embora pouco influencie no valor do ângulo de atrito, há uma notável influência sobre a coesão, que diminui com a inundação do solo.

Realizou-se saídas de campo (totalizando sete dias), nas quais foram executados 20 ensaios BST situados nas unidades geotécnicas de solo residual. Para a definição da localização dos pontos, buscou-se sua distribuição geográfica por toda a área da bacia hidrográfica, conforme se pode observar na Figura 86. Contudo, não foi possível acessar as áreas mais elevadas das unidades geotécnicas Ca e Cf (situadas nos limites Norte e Sul da área de estudo), devido a impossibilidade de acesso.

Figura 86 - Localização dos ensaios BST na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: elaborado pela Autora.

Ainda, levou-se em consideração a área de cada unidade geotécnica, conforme descrita no Quadro 10, para definir um número mínimo de ensaios BST a ser realizado. Desse modo, para a unidade geotécnica que abrange maior área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foram executados um maior número de ensaios (na unidade Cgn, com 19,3km², foram executados 5 ensaios e na unidade Ca, com 18,6km², 4 ensaios). Em contrapartida, na unidade geotécnica de solo residual com menor área na bacia, foram executados 2 ensaios (na unidade Cde, com 0,52km²). As informações detalhadas sobre os ensaios BST e o registro fotográfico podem ser observadas na Tabela 15 e na Figura 87, respectivamente.

Tabela 15 - Informações relativas aos ensaios: número de identificação, unidade geotécnica, coordenadas UTM, altitude, relevo e data do ensaio.

Número do ensaio	Unidade Geotécnica e n°. ponto	Coordenadas UTM (Zona 22S, MC -51°)		Altitude [m]	Modelado de Relevo	Data do ensaio
		<i>mE</i>	<i>mN</i>			
01*	Cf-1	714205	7026890	26	Colinoso	20/10/2017
02*	Cpi-1	703217	7031631	181	Colinoso	20/10/2017
03*	Cpi-2	703217	7031631	181	Colinoso	05/12/2017
04*	Ca-1	715674	7027664	45	Colinoso	05/12/2017
05*	Cde-1	701822	7031514	187	Rampa Colúvio	05/12/2017
06*	Cc-1	703515	7031855	165	Colinoso	05/12/2017
07*	Cgn-1	701746	7032148	243	Colinoso	21/12/2017
08	Cf-2	710938	7027762	88	Colinoso	11/12/2020
09	Ca-2	705590	7030298	72	Colinoso	11/12/2020
10	Cpi-3	704132	7030701	208	Colinoso	11/12/2020
11	Cgn-2	701853	7033927	382	Montanhoso	12/12/2020
12	Cgn-3	703364	7033587	230	Colinoso	12/12/2020
13	Ca-3	711223	7029343	41	Colinoso	01/05/2021
14	Cf-3	709836	7028354	20	Colinoso	01/05/2021
15	Cc-2	706709	7029809	65	Colinoso	01/05/2021
16	Cde-2	704765	7031502	118	Rampa Colúvio	01/05/2021
17	Cc-3	702286	7029860	340	Montanhoso	02/05/2021
18	Cgn-4	700364	7032700	417	Montanhoso	02/05/2021
19	Cgn-5	703931	7034369	315	Montanhoso	02/05/2021
20	Ca-4	707335	7028628	47	Colinoso	02/05/2021

* Ensaio realizado em colaboração com Degering (2018).

Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 87 - Execução dos ensaios BST durante as saídas de campo na área de estudo.





Fonte: elaborado pela Autora.

O ensaio BST executado em cada um dos pontos descritos possuiu no mínimo três estágios, em que foram aplicadas tensões normais (σ) crescentes. Conforme se pode observar na Tabela 16, no estágio 1 as tensões normais variaram de 25 a 40kPa; no estágio 2 variaram entre 50 e 70kPa; no estágio 3 variaram entre 70 e 90kPa; e nos dois pontos em que se executou o estágio 4, a tensão aplicada foi de 90 e 95kPa.

Tabela 16 - Informações relativas aos ensaios: profundidade de execução, tensão normal (σ), tempo de consolidação e tensão cisalhante (τ) em cada estágio.

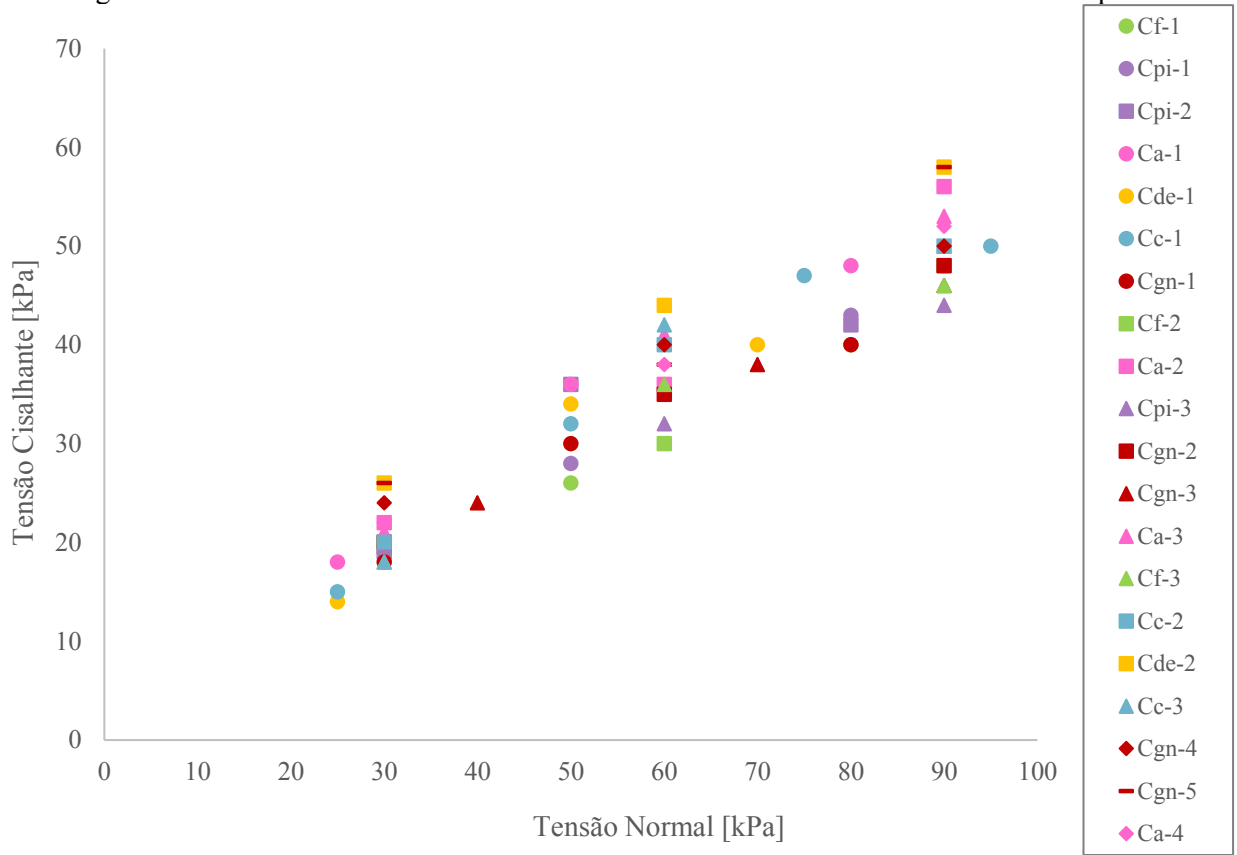
Id.	ESTÁGIO 1				ESTÁGIO 2				ESTÁGIO 3				ESTÁGIO 4			
	Prof. [cm]	σ [kPa]	Cons. [min.]	τ [kPa]	Prof. [cm]	σ [kPa]	Cons. [min.]	τ [kPa]	Prof. [cm]	σ [kPa]	Cons. [min.]	τ [kPa]	Prof. [cm]	σ [kPa]	Cons. [min.]	τ [kPa]
Cf-1	90	30	15	19	70	50	15	26	70	80	10	40	-	-	-	-
Cpi-1	75	30	15	19	75	50	15	28	55	80	15	43	-	-	-	-
Cpi-2	80	30	15	19	80	50	15	36	60	80	15	42	-	-	-	-
Ca-1	70	25	10	18	70	50	10	36	50	80	10	48	-	-	-	-
Cde-1	60	25	15	14	60	50	10	34	40	70	10	40	40	90	10	48
Cc-1	75	25	15	15	75	50	15	32	55	75	15	47	55	95	15	50
Cgn-1	80	30	10	18	80	50	10	30	60	80	10	40	-	-	-	-
Cf-2	80	30	15	20	80	60	15	30	60	90	15	48	-	-	-	-
Ca-2	80	30	10	22	80	60	10	36	60	90	10	56	-	-	-	-
Cpi-3	70	30	15	21	70	60	15	32	50	90	15	44	-	-	-	-
Cgn-2	70	30	10	20	70	60	10	35	50	90	10	48	-	-	-	-
Cgn-3	70	40	10	24	70	70	10	38	50	90	10	46	-	-	-	-
Ca-3	80	30	10	21	80	60	10	41	60	90	10	53	-	-	-	-
Cf-3	70	30	15	18	70	60	15	36	50	90	15	46	-	-	-	-
Cc-2	70	30	10	20	70	60	10	40	50	90	10	50	-	-	-	-
Cde-2	70	30	10	26	70	60	10	44	50	90	10	58	-	-	-	-
Cc-3	70	30	10	18	70	60	10	42	50	90	10	50	-	-	-	-
Cgn-4	70	30	10	24	70	60	10	40	50	90	10	50	-	-	-	-
Cgn-5	75	30	10	26	55	60	10	38	55	90	10	58	-	-	-	-
Ca-4	70	30	10	22	70	60	10	38	50	90	10	52	-	-	-	-

Fonte: elaborado pela Autora.

Na Tabela 16 também são apresentados os valores das tensões cisalhantes observadas no momento da ruptura do solo, denominada tensão cisalhante máxima ($\tau_{\text{máx}}$), em cada estágio do ensaio. Observa-se que no estágio 1 as tensões de cisalhamento variaram de 14 a 26kPa; no estágio 2 variaram entre 26 e 44kPa; no estágio 3 variaram entre 40 e 58kPa; e nos dois pontos em que se executou o estágio 4, a tensão cisalhante obtida foi de 48 e 50kPa

Por fim, a partir dos referidos dados obtidos nos estágios do ensaio BST, foi possível elaborar um gráfico de tensão cisalhante máxima *versus* tensão normal ($\tau_{\text{máx}} \times \sigma$) para todos os solos ensaiados, conforme se pode observar na Figura 88.

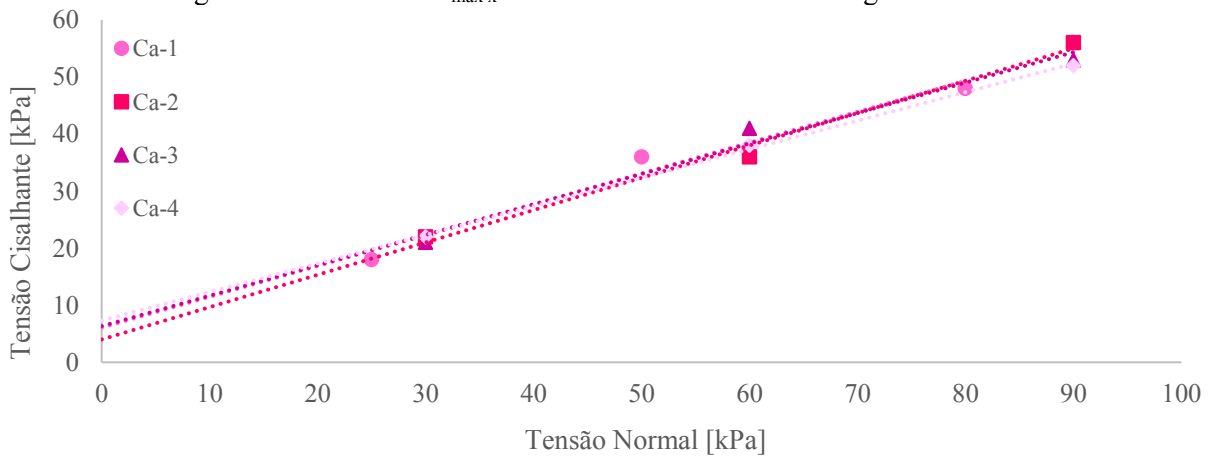
Figura 88 - Gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal dos ensaios BST em campo.



Fonte: elaborado pela Autora.

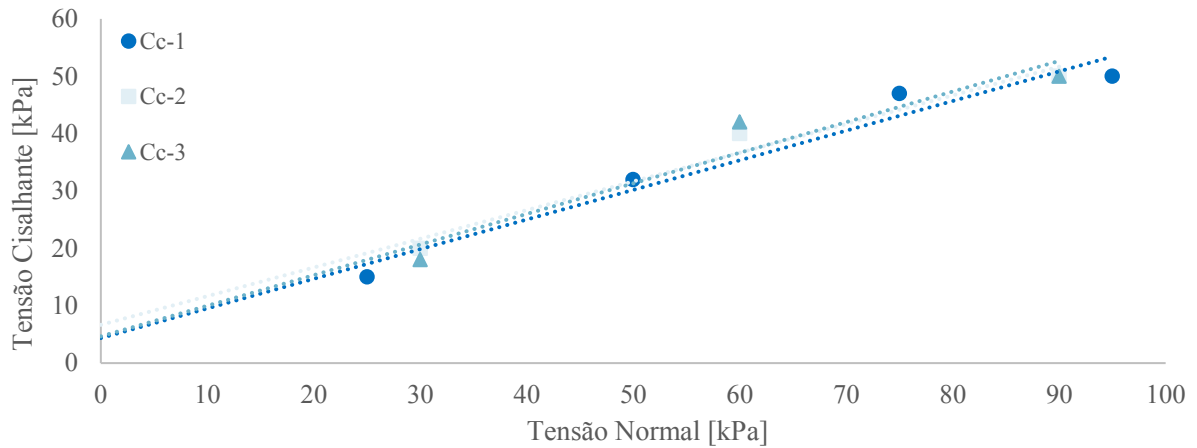
A fim de auxiliar na observação do gráfico apresentado na Figura 88, foram elaborados os respectivos gráficos de $\tau_{m\acute{a}x} \times \sigma$ por unidade geotécnica, apresentando, ainda, as envoltórias de ruptura para cada ponto (Figuras 89 a 94).

Figura 89 - Gráfico de $\tau_{m\acute{a}x} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Ca.



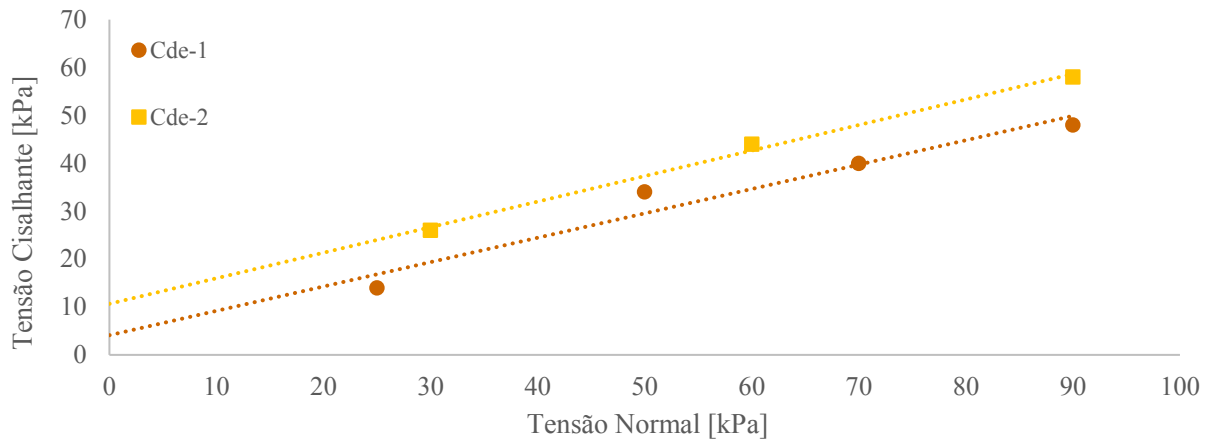
Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 90 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cc.



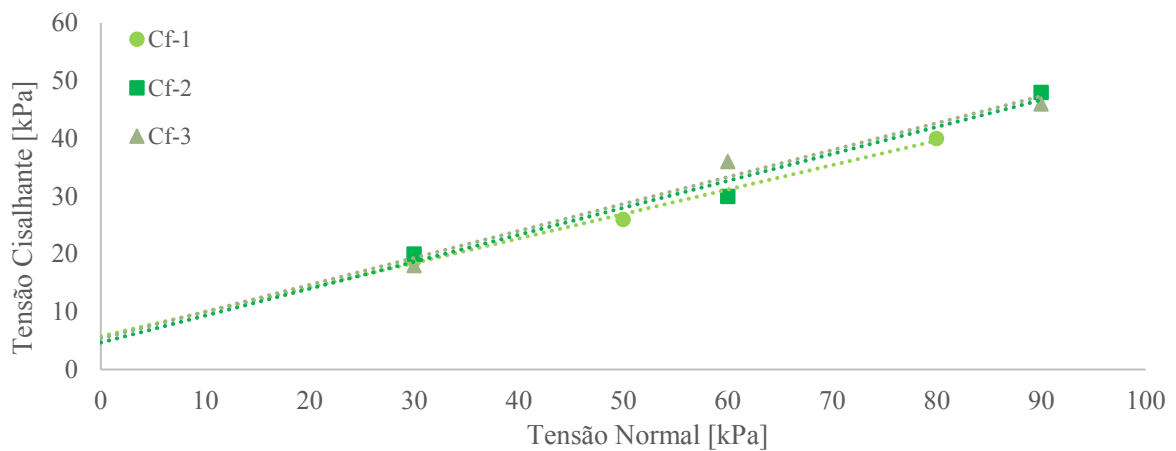
Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 91 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cde.



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 92 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cf.



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 93 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cpi.

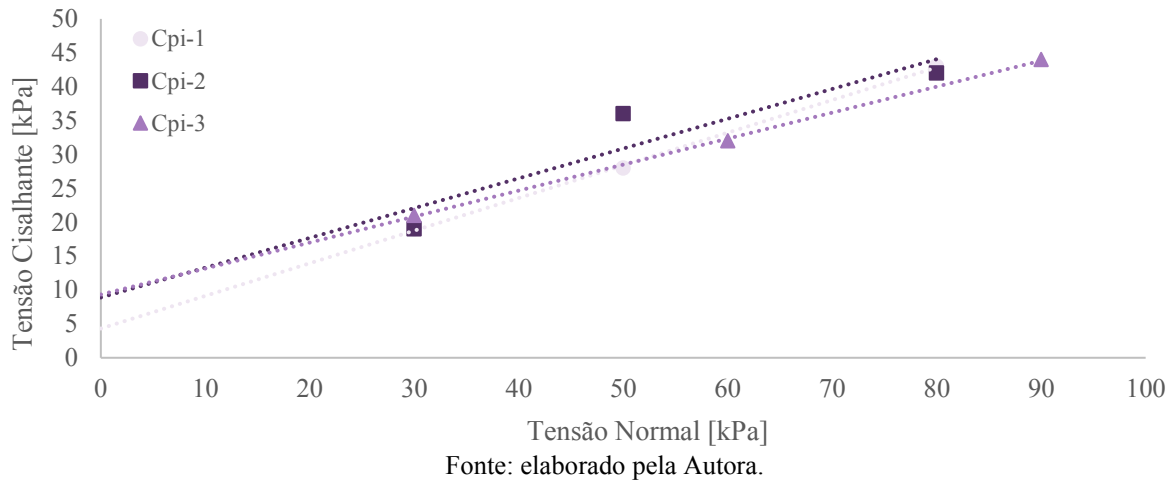
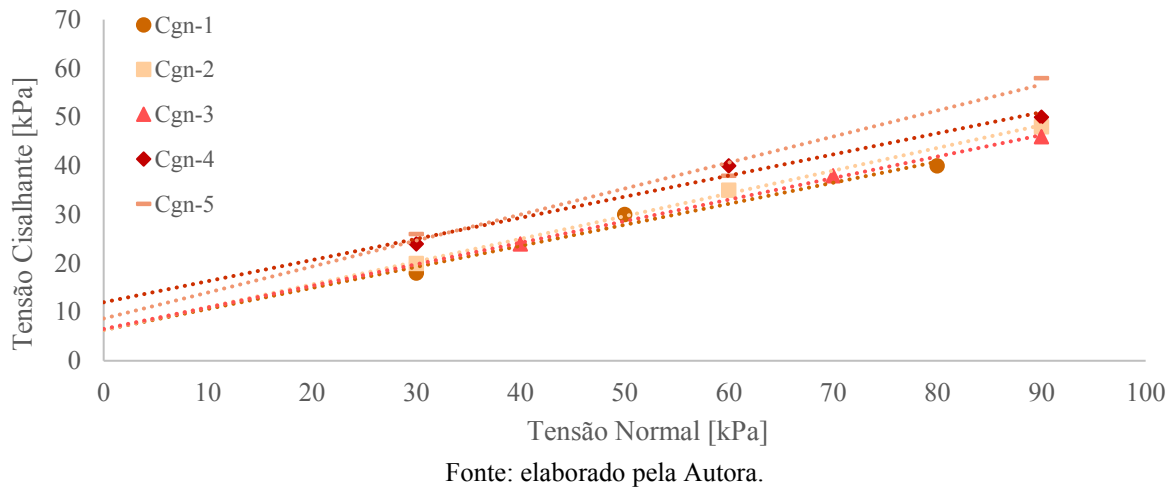


Figura 94 - Gráfico de $\tau_{\text{máx}} \times \sigma$ dos ensaios BST na unidade geotécnica Cgn.



Por intermédio das envoltórias são obtidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito interno (φ), a partir do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A Tabela 17 apresenta as informações obtidas dos gráficos, como a equação e o coeficiente de determinação (r^2) da envoltória, e os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos ensaiados.

Tabela 17 - Informações relativas aos ensaios: condição, equação e coeficiente de determinação (r^2) da reta, valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos.

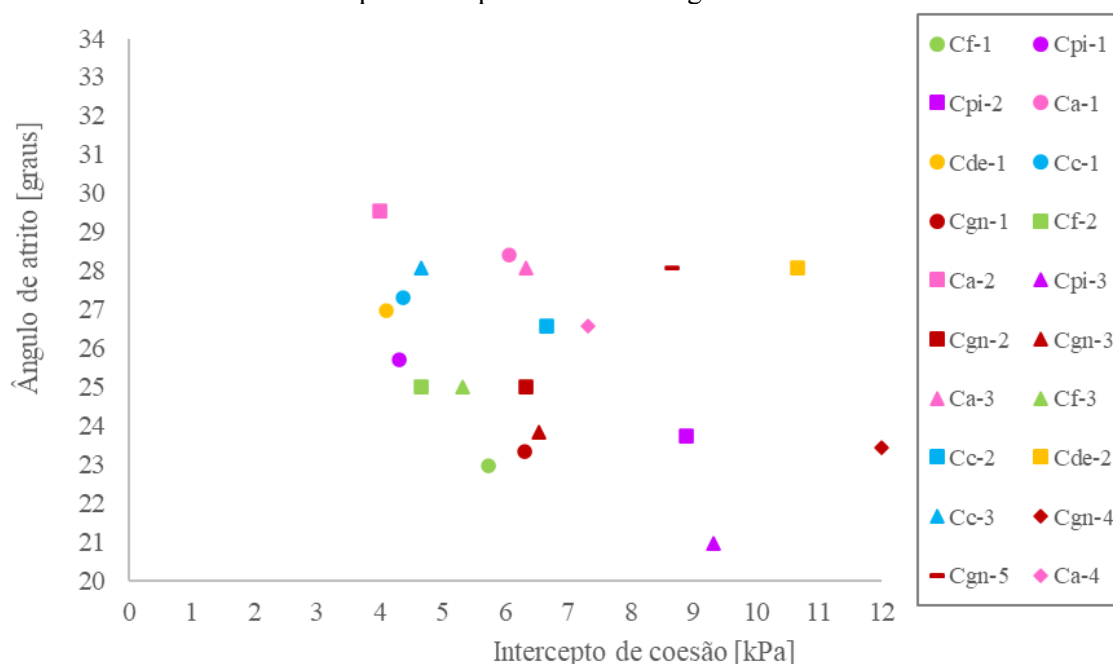
Unidade Geotécnica e nº. ponto	Condição do ensaio	r^2	Equação	Intercepto coesivo [kPa]	Ângulo de atrito [grau]
Cf-1	Inundado	0,9944	$\tau=0,4237\sigma+5,7368$	5,74	22,96
Cpi-1	Inundado	0,9992	$\tau=0,4816\sigma+4,3158$	4,32	25,72
Cpi-2	Inundado	0,8594	$\tau=0,4395\sigma+8,8947$	8,89	23,73
Ca-1	Inundado	0,9722	$\tau=0,5407\sigma+6,0659$	6,07	28,40
Cde-1	Inundado	0,9502	$\tau=0,5089\sigma+4,1024$	4,10	26,97
Cc-1	Inundado	0,9542	$\tau=0,5165\sigma+4,3657$	4,37	27,32
Cgn-1	Inundado	0,9722	$\tau=0,4316\sigma+6,3158$	6,32	23,35
Cf-2	Inundado	0,9735	$\tau=0,4667\sigma+4,6667$	4,67	25,02
Ca-2	Inundado	0,9897	$\tau=0,5667\sigma+4,00$	4,00	29,54
Cpi-3	Inundado	0,9994	$\tau=0,3833\sigma+9,3333$	9,33	20,97
Cgn-2	Inundado	0,9983	$\tau=0,4667\sigma+6,3333$	6,33	25,02
Cgn-3	Inundado	0,9983	$\tau=0,4421\sigma+6,5263$	6,53	23,85
Ca-3	Inundado	0,9796	$\tau=0,5333\sigma+6,3333$	6,33	28,07
Cf-3	Inundado	0,9735	$\tau=0,4667\sigma+5,3333$	5,33	25,02
Cc-2	Inundado	0,9643	$\tau=0,5\sigma+6,6667$	6,67	26,57
Cde-2	Inundado	0,9948	$\tau=0,5333\sigma+10,667$	10,67	28,07
Cc-3	Inundado	0,9231	$\tau=0,5333\sigma+4,6667$	4,67	28,07
Cgn-4	Inundado	0,9826	$\tau=0,4333\sigma+12,00$	12,00	23,43
Cgn-5	Inundado	0,9796	$\tau=5,333\sigma+8,6667$	8,67	28,07
Ca-4	Inundado	0,9985	$\tau=0,5\sigma+7,3333$	7,33	26,57

Fonte: elaborado pela Autora.

Observa-se que os parâmetros de resistência do solo apresentaram valores esperados para um perfil típico de solo residual em um horizonte C. Os valores de intercepto de coesão variaram de 4,00kPa (na unidade geotécnica Ca com relevo colinoso, ponto 2) a 12,00kPa (na unidade geotécnica Cgn com relevo montanhoso, ponto 4), e a média entre os dados foi de 6,62kPa. Quanto ao ângulo de atrito, os valores variaram de 20,97° (na unidade geotécnica Cpi com relevo colinoso, ponto 3) a 29,54° (na unidade geotécnica Ca com relevo colinoso, ponto 2), e a média entre os dados foi de 25,84°. Em geral, essa variação está relacionada à distribuição granulométrica e à composição dos solos, ou seja, quanto maior a porcentagem de argila, maior a coesão entre os grãos, e quanto maior o teor de areia, maior o ângulo de atrito entre os grãos do solo.

Para uma melhor visualização entre os resultados em cada unidade geotécnica de solo residual da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, elaborou-se gráficos a partir dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nos ensaios BST. Na Figura 95 é apresentado para cada ponto de realização do ensaio, e na Figura 96, por modelado de relevo.

Figura 95 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos nos ensaios BST em campo, para cada ponto na unidade geotécnica.



Fonte: elaborado pela Autora.

O maior número de ensaios foi executado na unidade geotécnica Cgn (que abrange 30,8% da área da bacia), seguido pela unidade geotécnica Ca (que abrange 29,6% da área da bacia). Em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nos ensaios BST executados na unidade geotécnica Cgn, observou-se proximidade entre os dados dos pontos 1, 2 e 3, sobretudo do valor de intercepto coesivo, bem como entre os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito para os pontos 1 e 3 da unidade geotécnica Ca.

O menor número de ensaios foi executado na unidade geotécnica Cde (que abrange 0,8% da área da bacia). Nessa unidade foram observados os valores de intercepto coesivo mais discrepantes entre os pontos ensaiados, dada a heterogeneidade do solo. Os depósitos colúviais da bacia hidrográfica são constituídos por sedimentos inconsolidados, com grande variação granulométrica e blocos soltos, formados a partir da deposição dos materiais provenientes dos

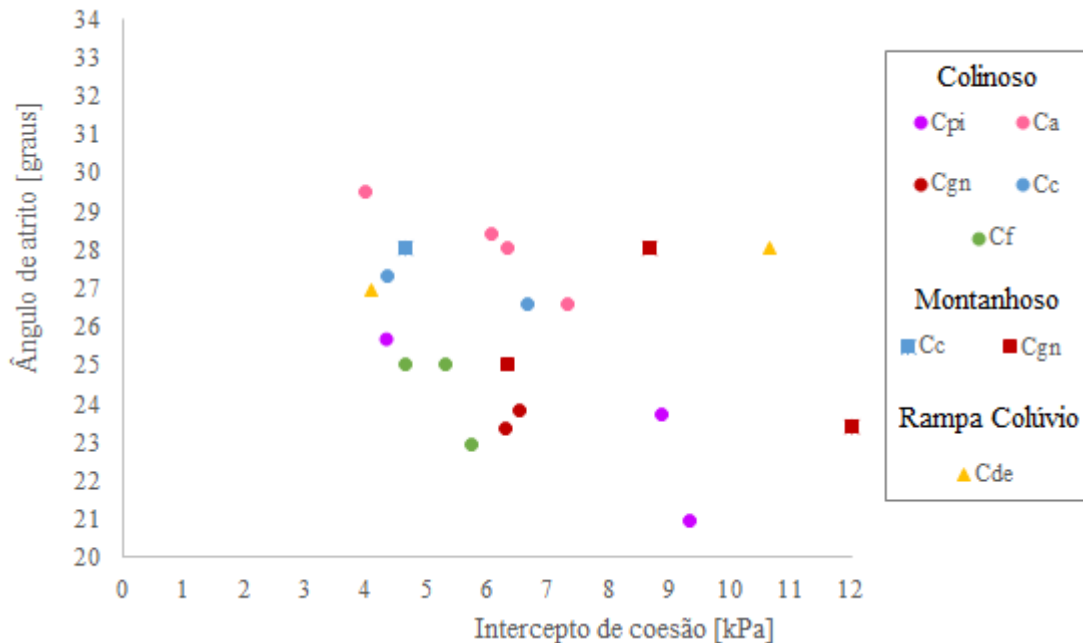
fluxos de detritos ocorridos em novembro de 2008. De acordo com a caracterização geotécnica realizada por Sbroglia (2015), a composição do solo variou entre argila a pedregulho grosso.

Em relação aos valores de intercepto coesivo obtidos entre os pontos de ensaios para cada unidade geotécnica, a menor média foi para as unidades Cc, de 5,24kPa, e Cf, de 5,25kPa; e a maior média foi obtida nas unidades geotécnicas Cgn, de 7,97kPa, e Cpi, de 7,51kPa. Em contrapartida, entre os valores de ângulo de atrito obtidos nos pontos de ensaios para cada unidade geotécnica, a menor média foi para a unidade Cpi, de 23,47°, e a maior média foi obtida na unidade geotécnica Ca, de 28,15°.

Os valores para o parâmetro ângulo de atrito estão em consonância com a caracterização geotécnica realizada por Sbroglia (2015), na qual foi observado que o solo da unidade Ca é predominantemente arenoso, com 47,4% de areia em sua composição, e apresentou o menor valor do índice de vazios, de 0,96; e a unidade Cpi, por sua vez, observou-se um solo argiloso, com um percentual de 52,7% de argila, elevados valores do índice de vazios, do teor de umidade natural e de densidade.

Analisando-se a variação entre os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada unidade geotécnica, observou-se que a maior variação foi de 6,6kPa entre os valores de intercepto de coesão obtidos entre os pontos ensaiados na unidade Cde, e a menor variação foi de 1,1kPa entre os pontos da unidade Cf. Em relação ao ângulo de atrito, a maior variação foi de 4,8° entre os ensaios realizados na unidade Cpi, e a menor variação foi de 1,1° na unidade Cde.

Figura 96 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos obtidos nos ensaios BST em campo, por unidade geotécnica e modelado de relevo.



Fonte: elaborado pela Autora.

Em relação ao modelado de relevo, o maior número de ensaios foi realizado no relevo colinoso (que abrange 47,3% da área da bacia) e o menor número foi nas rampas de colúvio (que abrange 0,8% da área da bacia). A maior variação entre os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada modelado de relevo foi entre os valores de intercepto de coesão, de 7,3kPa, entre os pontos no relevo montanhoso e a menor variação foi de 5,3kPa entre os pontos do modelado de relevo colinoso. Em relação ao ângulo de atrito, a maior variação foi de 8,6° entre os ensaios realizados na no relevo colinoso, e a menor variação foi de 1,1° nas rampas de colúvio.

Para o relevo montanhoso, os valores de intercepto de coesão variam de 4,67kPa a 12,00kPa, e a média entre os dados foi de 7,92kPa. O relevo colinoso apresentou valores de 4,00kPa a 9,33kPa, e a média entre os dados foi de 6,13kPa. As rampas de colúvio, por sua vez, apresentaram valores de 4,10kPa e 10,67kPa, e média de 7,39kPa. Em relação ao parâmetros ângulo de atrito, o relevo montanhoso apresentou valores variando de 23,43° a 28,07°, e média entre os dados de 26,15°. O relevo colinoso apresentou valores de 20,97 a 29,54°, e a média entre os dados foi de 25,51°. Por fim, as rampas de colúvio apresentaram valores de 26,97° e 28,07°, e média de 27,52kPa.

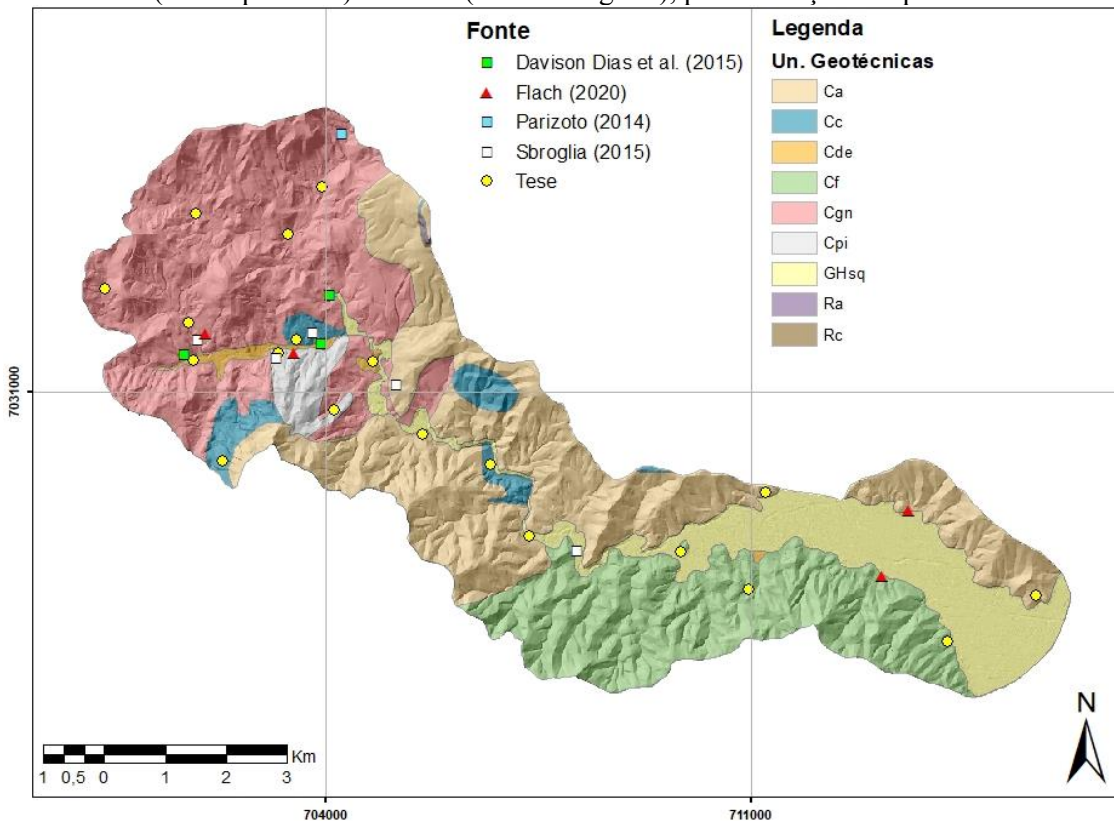
5.4 ESPACIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os cenários de espacialização foram elaborados por meio de geoprocessamento a partir de um banco de dados georreferenciado dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

5.4.1 Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú

Fez-se um levantamento dos trabalhos realizados na área de estudo, nos quais foram obtidos, por meio de ensaios geotécnicos, os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, intercepto coesivo e ângulo de atrito, e o peso específico, compondo, assim, um banco de dados georreferenciado. A localização dos pontos de ensaios de campo *Borehole Shear Test* (BST) ou de coleta do corpo de prova para execução do ensaio de Cisalhamento Direto (CD) em laboratório pode ser observada na Figura 97.

Figura 97 - Localização dos pontos de ensaios BST (ícone redondo), de coleta do corpo de prova para ensaios CD (ícone quadrado) e ambos (ícone triangular), para obtenção dos parâmetros de resistência.



Fonte: elaborado pela Autora.

No total, foram levantados 37 dados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, sendo 14 de trabalhos acadêmicos (PARIZOTO, 2014; SBROGLIA, 2015; FLACH, 2020), 3 de projeto na área de geotecnia (DIAS; PARIZOTO; ESPÍNDOLA, 2015) e 20 obtidos pelos ensaios realizados para esta Tese. Em relação à área de estudo, de modo geral, cada ensaio abrangeu 1,7km² da bacia hidrográfica, além disso, ocorreu uma espacialização relativamente considerável por toda a área.

O banco de dados georreferenciado para a área de estudo é apresentado na Tabela 18. Destaca-se que 65% (24 dados) são parâmetros obtidos em campo, por meio do ensaio *Borehole Shear Test* (BST), e 35% (13 dados) foram obtidos em laboratório, por meio do ensaio de Cisalhamento Direto (CD), sendo todos eles executados na condição inundada.

Tabela 18 - Banco de dados georreferenciado dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

Un. Geot	Relevo	Coordenadas UTM (Zona 22S, MC -51°)		Tipo do ensaio	Intercepto coesivo [kPa]	Ângulo de atrito [grau]	γ_{nat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	Fonte
		E [m]	N [m]						
Ca	Colinoso	705152	7031131	CD	8,42	26,50	17,40	19,00	Sbroglia (2015)
		713570	7029051	CD	16,50	24,80	15,60	-	Flach (2020)
		713570	7029051	BST	9,80	25,30	16,60	-	Flach (2020)
		715674	7027664	BST	6,07	28,40	-	-	Tese*
		705590	7030298	BST	4,00	29,54	-	-	Tese
		711223	7029343	BST	6,33	28,07	-	-	Tese
		707335	7028628	BST	7,33	26,57	-	-	Tese
Cc	Colinoso	703777	7031975	CD	5,24	29,20	16,80	18,01	Sbroglia (2015)
		703515	7031855	BST	4,37	27,32	-	-	Tese*
		706709	7029809	BST	6,67	26,57	-	-	Tese
	Montanhoso	702286	7029860	BST	4,67	28,07	-	-	Tese
Cde	Rampas de Colúvio	701822	7031514	BST	4,10	26,97	-	-	Tese*
		704765	7031502	BST	10,67	28,07	-	-	Tese
Cf	Colinoso	708106	7028402	CD	2,94	25,30	16,80	18,39	Sbroglia (2015)
		713133	7027980	CD	13,4	27,20	14,50	-	Flach (2020)
		713133	7027980	BST	6,20	27,10	15,40	-	Flach (2020)
		714205	7026890	BST	5,74	22,96	-	-	Tese*

		710938	7027762	BST	4,67	25,02	-	-	Tese
		709836	7028354	BST	5,33	25,02	-	-	Tese
		701659	7031614	CD	27,00	28,00	-	-	Dias <i>et al.</i> (2015)
		703906	7031806	CD	21,28	38,90	18,90	20,18	Dias <i>et al.</i> (2015)
	Colinoso	704056	7032597	CD	21,46	26,31	17,08	17,95	Dias <i>et al.</i> (2015)
		701870	7031856	CD	6,95	31,80	17,30	19,52	Sbroglia (2015)
		703364	7033587	BST	6,53	23,85	-	-	Tese
Cgn		701746	7032148	BST	6,32	23,35	-	-	Tese*
		700364	7032700	BST	12,00	23,43	-	-	Tese
		703931	7034369	BST	8,67	28,07	-	-	Tese
		701853	7033927	BST	6,33	25,02	-	-	Tese
	Montanhoso	704250	7035248	CD	18,51	35,70	19,12	20,35	Parizoto (2014)
		702020	7031957	CD	12,30	29,30	10,70	-	Flach (2020)
		702020	7031957	BST	2,30	30,10	11,10	-	Flach (2020)
		703180	7031560	CD	12,96	15,80	14,60	16,67	Sbroglia (2015)
		703465	7031647	CD	7,00	31,10	14,50	-	Flach (2020)
Cpi	Colinoso	703465	7031647	BST	8,00	28,80	13,70	-	Flach (2020)
		703217	7031631	BST	4,32	25,72	-	-	Tese*
		703217	7031631	BST	8,89	23,73	-	-	Tese*
		704132	7030701	BST	9,33	20,97	-	-	Tese

* Ensaio realizado em colaboração com Degering (2018).

Fonte: elaborado pela Autora.

Ao comparar os dados obtidos pelos ensaios de BST realizados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa em relação aos dados da literatura, por unidade geotécnica, observou-se que para a unidade Ca os valores de intercepto coesivo apresentaram-se análogos aos apresentados pelo ensaio CD, com exceção do parâmetro obtido em laboratório por Flach (2020). Ainda, destaca-se a unidade Cc que apresentou resultados bem semelhantes entre os valores obtidos para os dois tipos de ensaios.

Em contrapartida, para a unidade Cgn observou-se uma grande variação entre os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nos campos realizados ao

longo desse trabalho em relação aos apresentados pelos outros autores, alcançando 20,68kPa de diferença para intercepto coesivo e 15,55° para ângulo de atrito.

Os menores valores de intercepto coesivo do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú são de 2,30kPa (Cgn de relevo montanhoso) e 2,94kPa (Cf de relevo colinoso), enquanto o maior valor é de 27,00kPa (Cgn de relevo colinoso); o menor valor de ângulo de atrito é de 15,80° (Cpi de relevo colinoso) e o maior de 38,90° (Cgn de relevo colinoso). O peso específico natural e saturado dos solos não apresentou variação significativa entre os dados, variando de 10,70 a 19,12kN/m³ e 16,67 a 20,35kN/m³, respectivamente.

De acordo com a Tabela 19, para a bacia hidrográfica, a média entre todos os valores do intercepto de coesão foi de 8,99kPa e do ângulo de atrito foi de 26,97°, se forem considerados somente os dados obtidos pelo ensaio de Cisalhamento Direto as médias serão de 13,38kPa e 28,45° e pelo ensaio de *Borehole Shear Test* serão de 6,61kPa e 26,17°, respectivamente. Dessa forma, observa-se que a diferença entre o parâmetro de intercepto coesivo foi mais que o dobro do valor obtido pelo BST, entre os dois tipos de ensaios, de 6,77kPa, enquanto a variação entre o parâmetro ângulo de atrito foi de cerca de 2°. Essa variação maior do valor de intercepto coesivo entre os dois ensaios também foi observada por Sakamoto *et al.* (2016), Sbroglia *et al.* (2018a) e Flach (2020).

Tabela 19 - Variação (V) entre a média dos valores dos parâmetros de intercepto de coesão e ângulo de atrito para os ensaios de Cisalhamento Direto (CD) e *Borehole Shear Test* (BST) do banco de dados da bacia hidrográfica (BH).

	Número de dados			Intercepto coesivo [kPa]				Ângulo de atrito [grau]			
	total	CD	BST	média	média CD	média BST	V	média	média CD	média BST	V
Unidades Geotécnicas											
Ca	7	2	5	8,35	12,46	6,71	5,75	27,03	25,65	27,58	1,93
Cc	4	1	3	5,24	5,24	5,24	0,00	27,79	29,20	27,32	1,88
Cde	2	0	2	7,39	-	7,39	-	27,52	-	27,52	-
Cf	6	2	4	6,38	8,17	5,49	2,69	25,43	26,25	25,03	1,23
Cgn	12	6	6	12,47	17,92	7,03	10,89	28,65	31,67	25,64	6,03
Cpi	6	2	4	8,42	9,98	7,64	2,35	24,35	23,45	24,81	1,36
Modelados de Relevo											
Montanhoso	7	2	5	9,25	15,41	6,79	8,62	28,53	32,50	26,94	5,56
Colinoso	28	11	17	9,04	13,01	6,46	6,55	26,54	27,72	25,78	1,94
Rampas Colúvio	2	0	2	7,39	-	7,39	-	27,52	-	27,52	-
BH	37	24	13	8,99	13,38	6,61	6,77	26,97	28,45	26,17	2,29

Fonte: elaborado pela Autora.

Entre as unidades geotécnicas, Cgn foi a que apresentou a maior média para o parâmetro intercepto coesivo, de 12,47kPa, enquanto Cf apresentou a menor, de 5,24kPa; para o parâmetro ângulo de atrito, Cgn foi a que apresentou a maior média, de 28,65°, e Cpi foi a menor, de 24,35°. Entre os modelados de relevo, o montanhoso foi que apresentou a maior média de intercepto coesivo, de 9,25kPa, e rampas de colúvio apresentaram a menor média, de 7,39kPa; em relação ao ângulo de atrito, o relevo montanhoso apresentou a maior média, de 28,53° e o relevo colinoso apresentou a menor, de 26,54°.

Analisando os dados obtidos por meio do ensaio de campo e de laboratório, observou-se que nos ensaios de Cisalhamento Direto foram apresentados os maiores valores, principalmente para o intercepto coesivo. Para esse parâmetro também se observou a maior variação entre as médias, de 0kPa na unidade geotécnica Cc a 10,89kPa na unidade geotécnica Cgn, enquanto o ângulo de atrito variou de 1,23° na unidade geotécnica Cf a 6,03° na unidade geotécnica Cgn.

Dessa forma, entre as unidades geotécnicas da bacia hidrográfica, a que apresentou maior variação entre os parâmetros obtidos pelos dois ensaios foi a Cgn, que também é a de maior área e que possui mais trabalhos realizados, totalizando 12 ensaios. A unidade Cgn caracteriza-se por possuir solo residual originado do gnaisse (Complexo Luiz Alves), que possui estrutura foliada ou bandada com direções variadas, composta por zonas máficas (mais escuras) e fêlsicas (mais claras). De acordo com Tomazzoli *et al.* (2012) e Flores *et al.* (2017), a rocha exibe com frequência enclaves máficos ou ultramáficos de diversos tamanhos, com formas angulosas ou arredondadas. Essas características, associadas à presença de numerosas falhas e zonas de cisalhamento, podem estar relacionadas à alteração das características geotécnicas do solo em diferentes locais da unidade, e que poderia estar relacionada à discrepância entre os dados obtidos pelos diferentes autores.

5.4.2 Cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos

A partir do banco de dados georreferenciado dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, apresentado na Tabela 18, foram gerados cenários com diferentes formas de distribuição espacial dos dados por meio dos mapas geotécnico, de modelados de relevo, de altitude, de declividade, de orientação das encostas, de forma das encostas, e dos elaborados por meio de interpolação.

Para cada classe dos mapas, foi calculada a média entre os parâmetros, conforme apresentado na Tabela 20, utilizando dados da literatura para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu e os mapas geotécnico e de modelados de relevo; e na Tabela 21, utilizando os mapas de altitude, declividade, orientação e formas das encostas. Para a interpolação por meio de krigagem, por sua vez, foi utilizada toda a malha de pontos dos valores dos parâmetros dos solos do banco de dados georreferenciado (Tabela 18).

Tabela 20 - Média dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada cenário de espacialização dos dados (mapa geotécnico e de modelados de relevo).

<i>Classes</i>	<i>Número de dados</i>	<i>Intercepto coesivo [kPa]</i>	<i>Ângulo de atrito [grau]</i>	<i>Peso esp. Saturado [kN/m³]</i>
Unidades Geotécnicas - Literatura				
Ca	27	12,82	29,71	19,23
Cc	2	15,10	24,75	18,01
Cde	21	10,40	32,16	19,55
Cf	8	9,67	28,74	19,47
Cgn	45	12,22	29,47	17,61
Cpi	12	18,80	29,01	19,00
Unidades Geotécnicas – Banco de dados Bacia Hidrográfica				
Ca	7	8,35	27,03	19,00
Cc	4	5,24	27,79	18,01
Cde	2	7,39	27,52	19,55
Cf	6	6,38	25,43	18,39
Cgn	12	12,47	28,65	19,50
Cpi	6	8,42	24,35	16,67
Modelados de relevo				
Colinoso	28	9,04	26,54	18,58
Montanhoso	7	9,25	28,53	20,35
Rampas de colúvio	2	7,39	27,52	19,55
Unidades Geotécnicas e Modelados de relevo				
Ca colinoso	7	8,35	27,03	19,00
Cc colinoso	3	5,43	27,70	18,01
Cc montanhoso	1	4,67	28,07	18,01
Cde rampas de colúvio	2	7,39	27,52	19,55
Cf colinoso	6	6,38	25,43	18,39
Cgn colinoso	6	14,92	28,70	19,13
Cgn montanhoso	6	10,02	28,60	20,35
Cpi colinoso	6	8,42	24,35	16,67

Fonte: elaborado pela Autora.

Tabela 21 - Média dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada cenário de espacialização dos dados (altitude, declividade, orientação e forma das encostas).

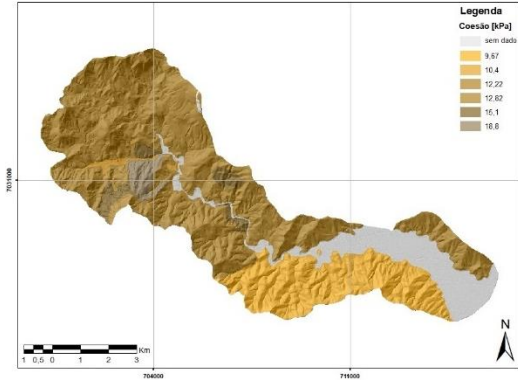
Classes	Resolução espacial 1m				Resolução espacial 10m			
	Número de dados	Intercepto coesivo [kPa]	Ângulo de atrito [grau]	Peso esp. saturado [kN/m ³]	Número de dados	Intercepto coesivo [kPa]	Ângulo de atrito [grau]	Peso esp. saturado [kN/m ³]
Altitude (metros)								
0-50	11	7,85	26,12	18,39	9	8,03	26,02	18,39
50-100	2	4,34	27,28	-	3	6,00	27,56	-
100-150	3	13,46	31,16	19,59	6	9,11	29,17	19,06
150-200	10	8,33	26,68	18,04	7	9,53	25,49	17,31
200-250	6	10,63	25,93	-	7	10,10	26,77	19,52
250-300	1	8,67	28,07	-	1	8,67	28,07	-
300-350	1	4,67	28,07	-	1	4,67	28,07	-
350-400	1	6,33	25,02	-	2	9,17	24,23	-
400-450	2	15,26	29,57	20,35	1	18,51	35,70	20,35
Declividade (graus)								
0-5	5	7,85	28,12	-	5	9,77	25,41	-
5-10	9	6,55	27,52	18,77	9	8,28	28,43	18,86
10-15	3	11,46	26,84	20,35	9	8,36	25,52	18,51
15-20	11	9,75	25,95	18,45	4	10,16	27,32	18,48
20-25	7	9,64	25,04	16,67	3	7,87	26,45	19,52
25-30	-	-	-	-	2	6,61	24,73	-
30-35	2	12,64	34,22	20,18	5	11,32	29,46	-
Orientação da encosta								
Norte	6	6,15	27,32	-	3	9,32	25,23	16,67
Nordeste	4	8,79	24,43	-	6	5,96	26,39	19,52
Leste	3	5,90	26,78	18,39	4	10,78	26,08	17,95
Sudeste	9	10,50	28,95	19,51	5	13,04	29,09	19,37
Sul	4	15,77	28,43	17,95	6	8,13	26,42	18,01
Sudoeste	3	7,32	29,31	19,52	3	11,96	32,77	20,18
Oeste	4	8,02	24,58	19,00	3	8,36	26,00	19,00
Noroeste	4	7,82	23,87	16,67	7	7,26	25,61	-
Forma da encosta								
Côncava	20	10,34	27,14	18,76	23	9,03	26,40	18,70
Retilínea	4	5,25	26,55	-	6	6,40	26,67	18,39
Convexa	13	8,06	26,85	-	8	10,82	29,88	19,10

Fonte: elaborado pela Autora.

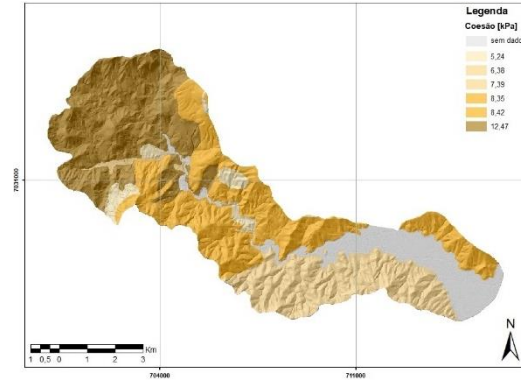
A partir dos cenários elaborados por meio dos atributos geológico-geotécnico, geomorfológico e de geoestatística realizou-se a análise da variabilidade dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

A Figura 98 apresenta os cenários de espacialização dos valores do parâmetro de intercepto coesivo [kPa], com a legenda distribuída em 7 classes (intervalo de 2kPa).

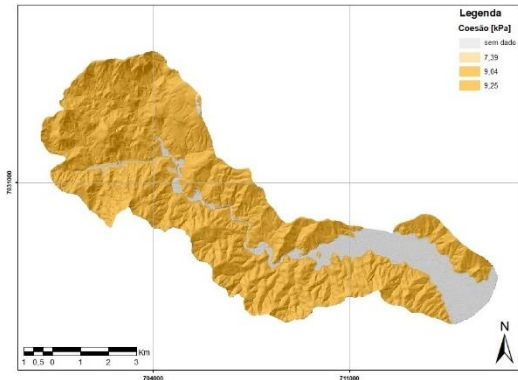
Figura 98 - Cenários de espacialização dos valores de intercepto coesivo do banco de dados.
Unidades Geotécnicas - Literatura



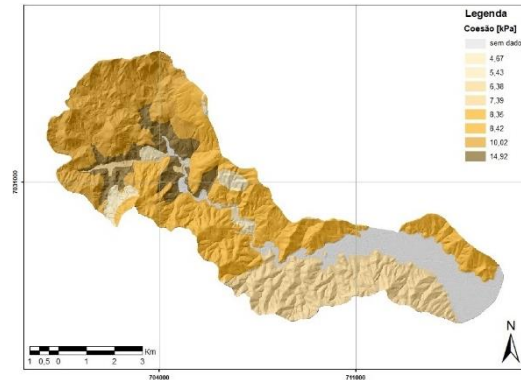
Unidades Geotécnicas – Banco de dados BH



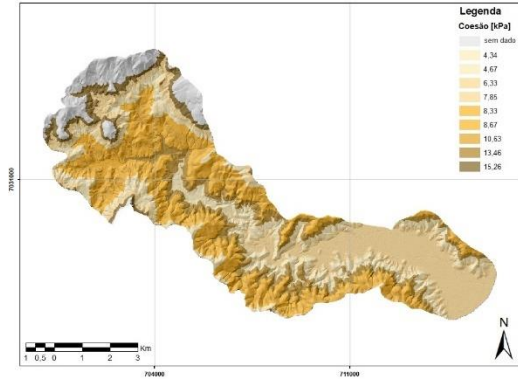
Modelados de relevo



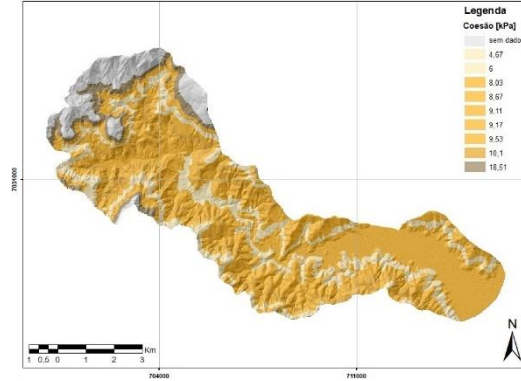
Unidades Geotécnicas e Modelados de relevo



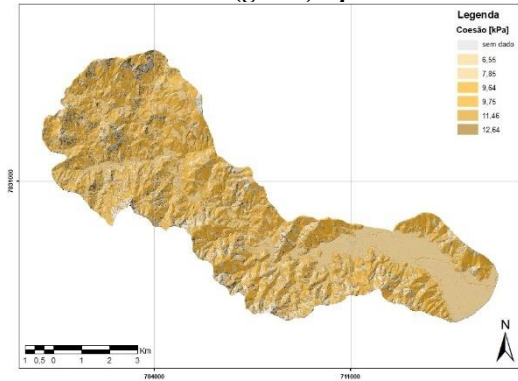
Altitude (metros) – pixel 1m



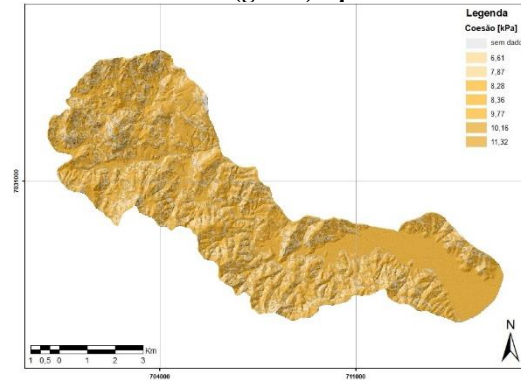
Altitude (metros) – pixel 10m

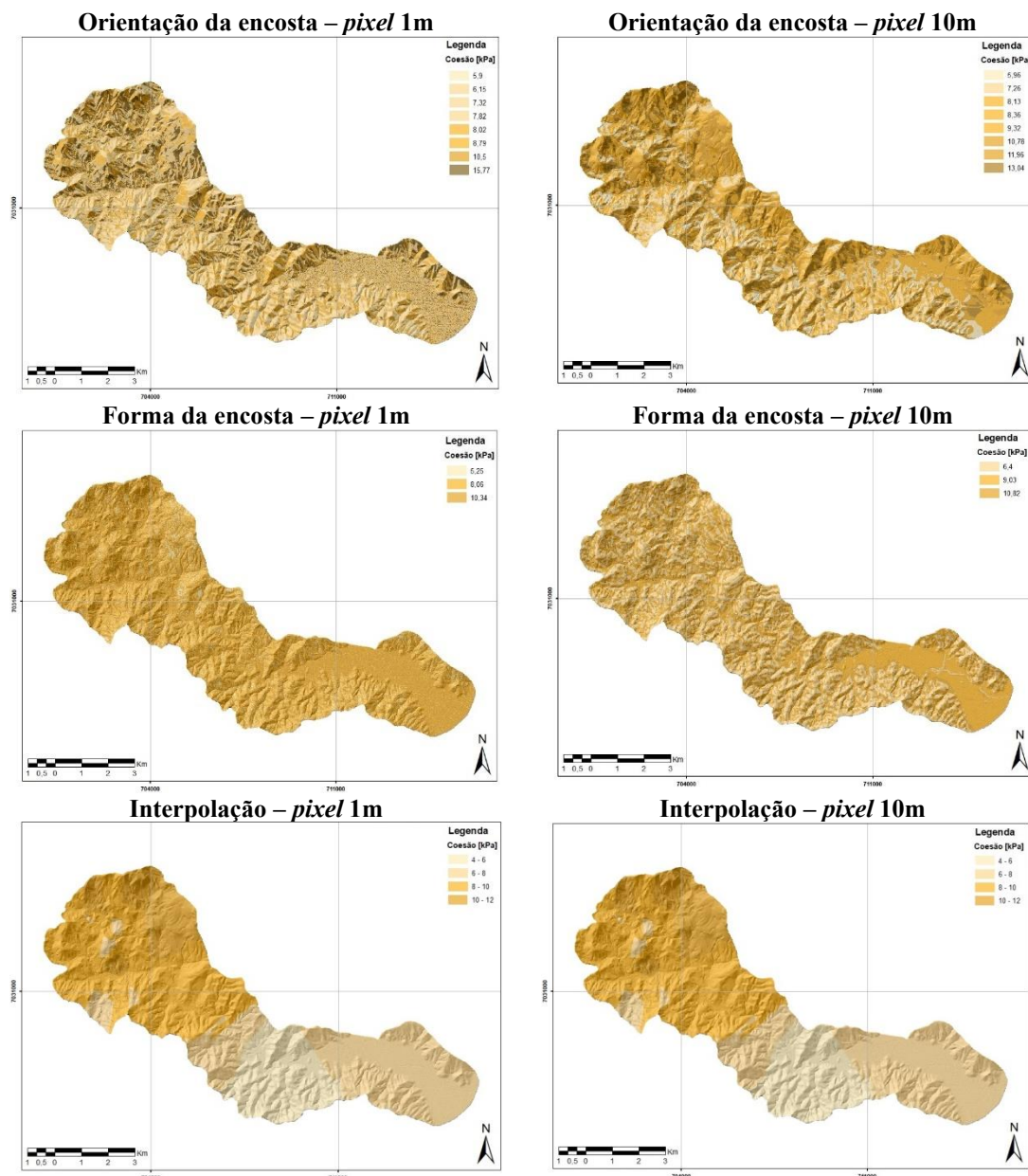


Declividade (graus) – pixel 1m



Declividade (graus) – pixel 10m





Fonte: elaborado pela Autora.

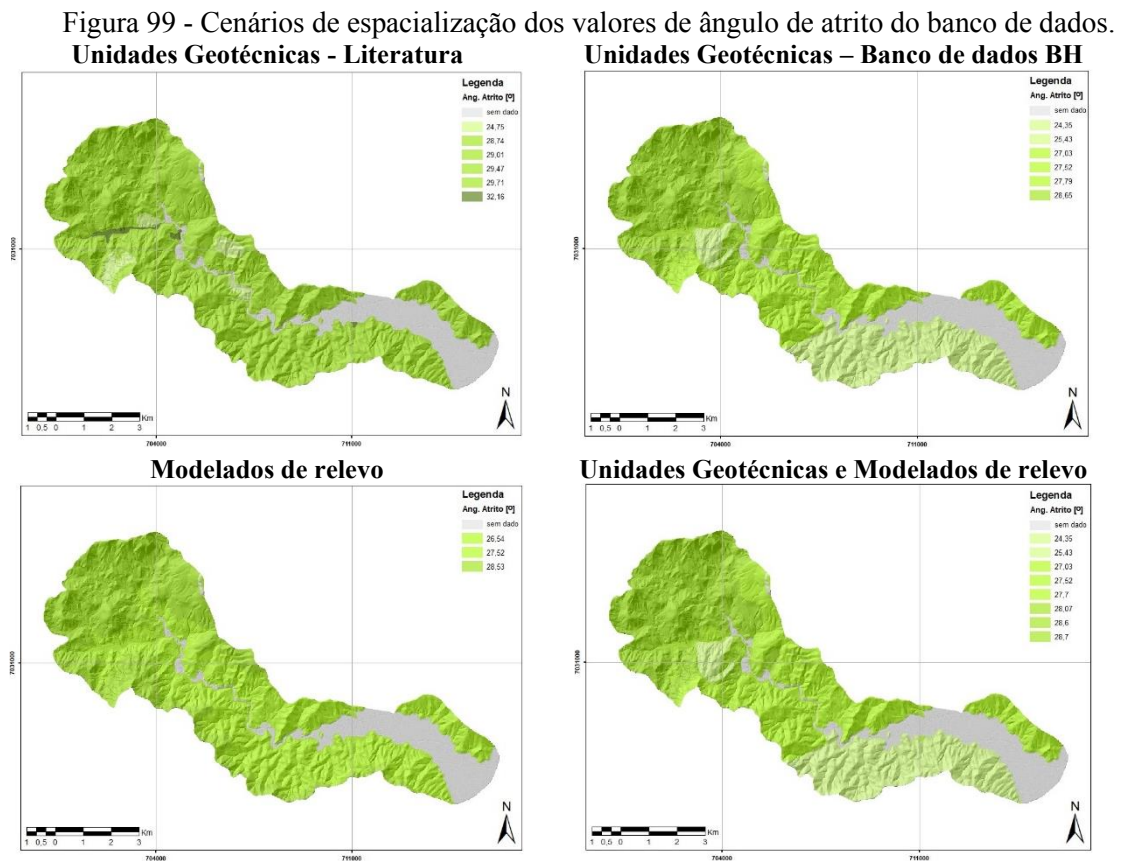
Conforme se pode observar nas Tabelas 20 e 21 e na Figura 98, as médias dos valores de intercepto de coesão variaram entre os cenários de espacialização dos dados. As maiores médias foram observadas no cenário que utilizou os dados da literatura obtidos para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, no total foram levantados 115 parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito para as unidades geotécnicas dessa bacia, disponibilizados no Apêndice A.

As maiores variações entre as médias dos valores de intercepto coesivo obtidas foram nos cenários com os dados espacializados por unidade geotécnica e por intervalo de altitude

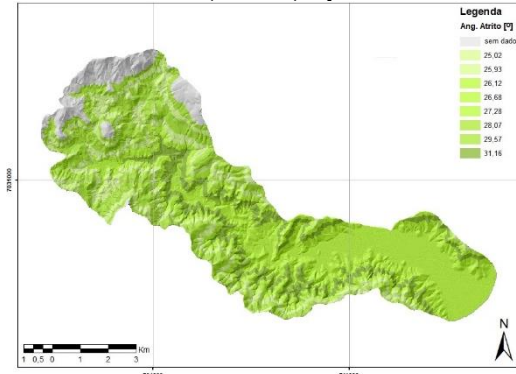
(resolução espacial de 1m), em contrapartida, no cenário com espacialização por modelado de relevo (montanhoso, colinoso e rampas de colúvio) ocorreram os valores mais homogêneos.

Os cenários elaborados a partir dos mapas de declividade, orientação e forma das encostas e por meio de interpolação apresentaram os parâmetros de intercepto coesivo na mesma escala de variação (cerca de 6 a 12kPa), porém com distribuição espacial totalmente distinta entre eles.

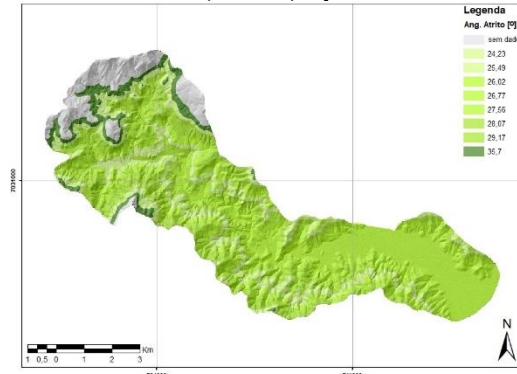
A Figura 99 apresenta os cenários de espacialização dos valores do parâmetro de ângulo de atrito [graus] do banco de dados georreferenciado, distribuído em 7 classes na legenda (intervalo de 2°).



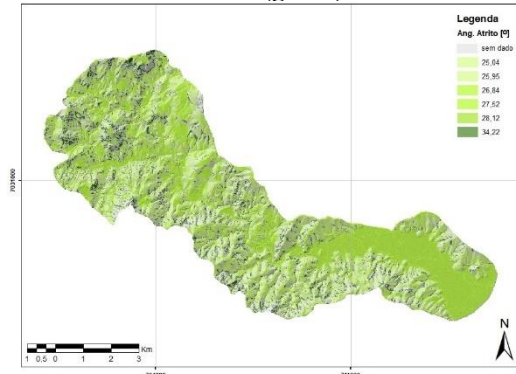
Altitude (metros) – pixel 1m



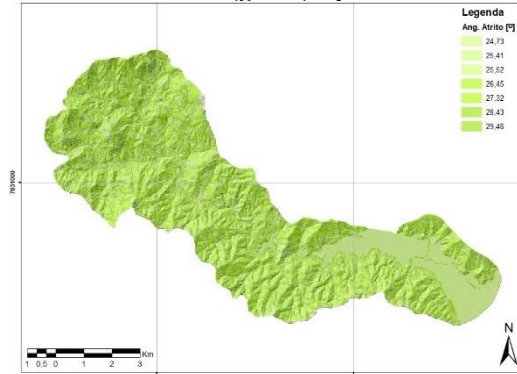
Altitude (metros) – pixel 10m



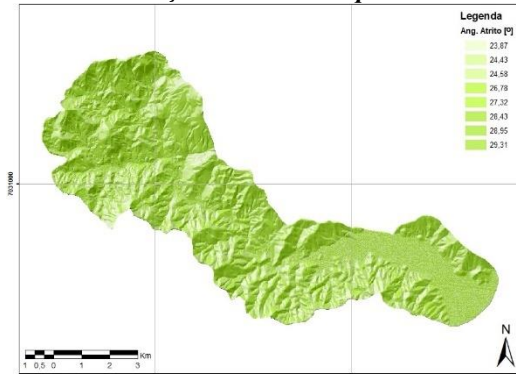
Declividade (graus) – 1m



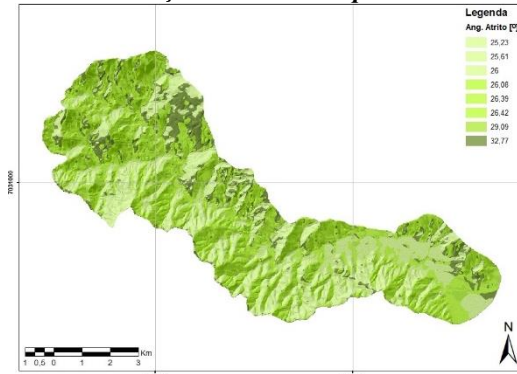
Declividade (graus) – pixel 10m



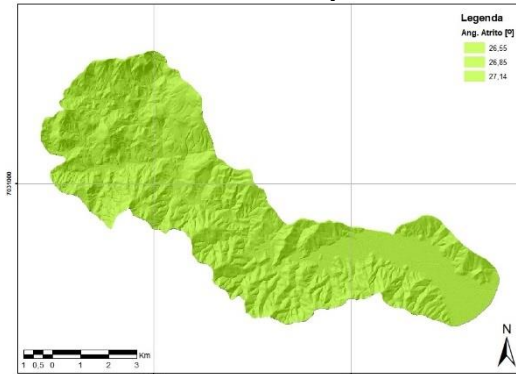
Orientação da encosta – pixel 1m



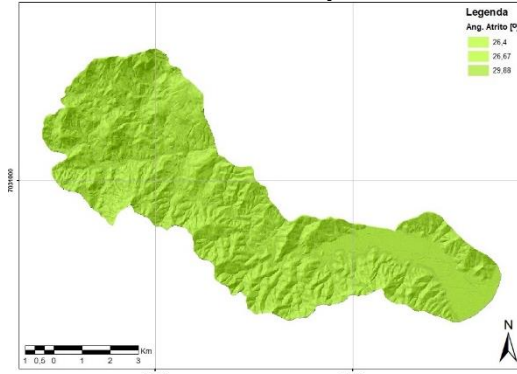
Orientação da encosta – pixel 10m

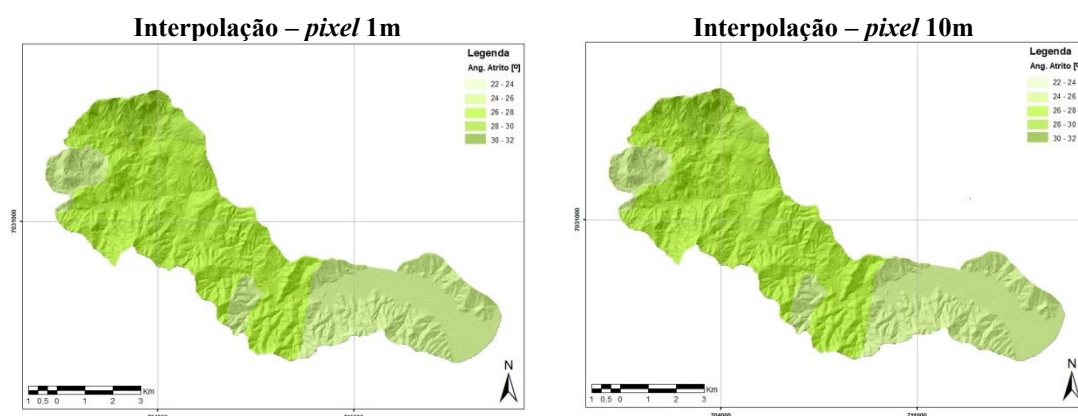


Forma da encosta – pixel 1m



Forma da encosta – pixel 10m





Fonte: elaborado pela Autora.

Observa-se nas Tabelas 20 e 21 e na Figura 99 que os cenários com espacialização do parâmetro ângulo de atrito apresentaram menor variação entre os dados em relação aos cenários com espacialização do intercepto coesivo.

As maiores médias ocorreram nos cenários elaborados com base no mapa de unidades geotécnicas dos dados coletadas da literatura para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, altitude e orientação das encostas (resolução espacial de 10m). Esses cenários também foram os que apresentaram as maiores variações entre as médias dos dados. O cenário que apresentou mais médias com valores menores de ângulo de atrito foi aquele elaborado do mapa de orientação das encostas com resolução espacial de 1m. Os cenários mais homogêneos, ou seja, com as menores variações entre as médias dos valores, são aqueles com espacialização dos dados por modelado de relevo (montanhoso, colinoso e rampas de colúvio) e forma das encostas.

Por fim, observou-se que os cenários elaborados com base nos polígonos das unidades geotécnicas da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú e o que levou em consideração também os modelados de relevo apresentaram resultados semelhantes. Bem como o cenário elaborado a partir da interpolação dos dados, que se apresentou visualmente similar àqueles, contudo, há diferenciação na distribuição espacial dos dados.

5.5 MODELAGEM DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS

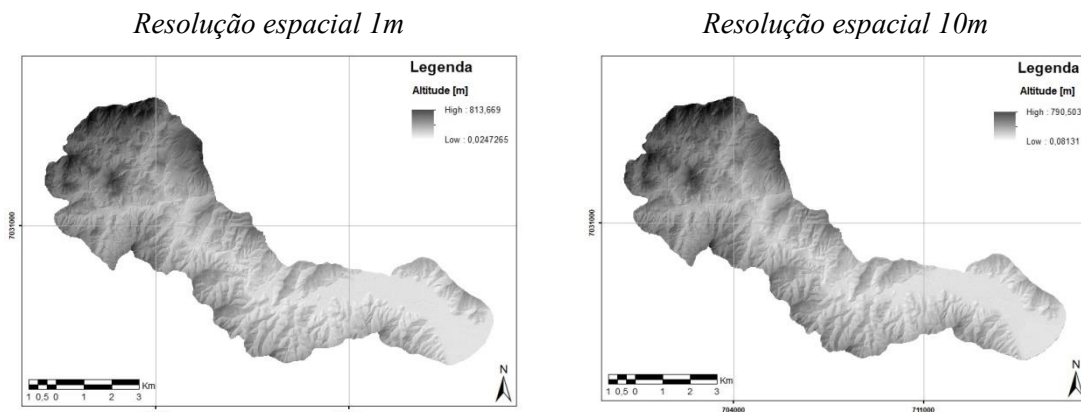
A partir do modelo matemático SHALSTAB foram gerados cenários de suscetibilidade a ocorrência de deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú. Os dados de entrada do modelo foram as variáveis espaciais topográficas, declividade (θ)

e área de contribuição por comprimento de contorno unitário (a/b), e as variáveis referentes aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, intercepto de coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), peso específico saturado (γ_{sat}) e a espessura de ruptura do solo (z).

5.5.1 Parâmetros topográficos

As camadas matriciais com as variáveis topográficas utilizadas na modelagem declividade (θ), em graus, e área de contribuição por comprimento de contorno unitário em infinitas direções (a/b), em m^2 (apresentadas no item 5.1 do Capítulo Resultados e Discussões), foram elaboradas a partir do MDE hidrologicamente consistido, no formato matricial, com resolução espacial de 1 e 10 metros (Figura 100).

Figura 100 - MDE hidrologicamente consistidos, com resolução de 1 e 10m, da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: elaborado pela Autora.

5.5.2 Parâmetros geotécnicos

Para os parâmetros dos solos, foram utilizados valores de intercepto de coesão (c), em Pa, ângulo de atrito (ϕ), em graus, massa específica saturada do solo (ρ_{sat}), em kg/m^3 , e cenários de profundidade de ruptura do solo (z), em m. Os parâmetros massa específica da água (ρ_w) e aceleração da gravidade (g) foram constantes nos valores de $1.000\text{kg}/\text{m}^3$ e $9,81\text{m}/\text{s}^2$, respectivamente.

Para as camadas vetoriais dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos foram utilizados os cenários descritos no Quadro 15 do Capítulo Materiais e Métodos e apresentados no item 5.4.2 “Cenários de especialização dos parâmetros geotécnicos” do

Capítulo Resultados e Discussões. No total, foram elaborados 15 cenários de distribuição dos valores de intercepto de coesão, ângulo de atrito e peso específico saturado do solo obtidos por meio de 37 ensaios de Cisalhamento Direto e *Borehole Shear Test*.

A Tabela 22 apresenta os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizados em cada cenário para modelagem com o SHALSTAB. A camada vetorial do respectivo cenário foi inserida na ferramenta *Automatic SHALSTAB Analysis (ASA)*, no *software* de geoprocessamento, para elaboração dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos.

Tabela 22 - Valores dos parâmetros geotécnicos utilizados nos cenários para a modelagem com o SHALSTAB.

	Cenários	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito	γ_{sat}
		[kPa]	[grau]	[kN/m ³]
SEM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS				
A	Média Literatura	13,22	29,84	18,51
B	Média Aritmética	8,99	26,97	18,76
C	Média Ponderada (geotecnia)	9,24	27,21	18,76
D	Média Ponderada (modelados de relevo)	9,12	27,43	19,19
E	Menos Conservador	27,00	38,9	16,67
F	Mais Conservador	2,30	15,80	20,35
COM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS				
G	Média Literatura (geotecnia)	Conforme dados da Tabela 20		
H	Média (geotecnia)	Conforme dados da Tabela 20		
I	Média (modelado relevo)	Conforme dados da Tabela 20		
J	Média (geotecnia + modelado relevo)	Conforme dados da Tabela 20		
K	Média (altitude)	Conforme dados da Tabela 21		
L	Média (declividade)	Conforme dados da Tabela 21		
M	Média (orientação da encosta)	Conforme dados da Tabela 21		
N	Média (forma da encosta)	Conforme dados da Tabela 21		
O	Interpolação (krigagem)	Conforme dados da Tabela 18		

Fonte: elaborado pela Autora.

Em relação à espessura do solo, sua variabilidade espacial resulta de interações complexas entre diversos fatores (topográficos, climáticos, químicos, físicos e biológicos), sendo de difícil mensuração com precisão, especialmente quando se trata de áreas extensas. Não obstante, a sua influência é relevante na ocorrência de movimentos de massa, sendo um parâmetro importante na avaliação da suscetibilidade quando se utilizam modelos determinísticos, uma vez que eles integram o efeito da infiltração e escoamento da água precipitada e da coesão do solo (WESTEN *et al.*, 2006).

Nesse contexto, é frequente a utilização da profundidade de ruptura do solo (z) de forma genérica, empregando-se um valor constante para toda a área de estudo. Nesta pesquisa, levando-se em consideração que os resultados do modelo SHALSTAB dependem, sobretudo, da qualidade dos dados de entrada, optou-se por utilizar 7 cenários, 4 deles sem a espacialização dos dados: profundidades constantes de 2, 5, 7 e 10 metros, e 3 deles elaborados a partir da espacialização do valor de z ao longo da bacia hidrográfica por meio de equações matemáticas, conforme Tabela 23.

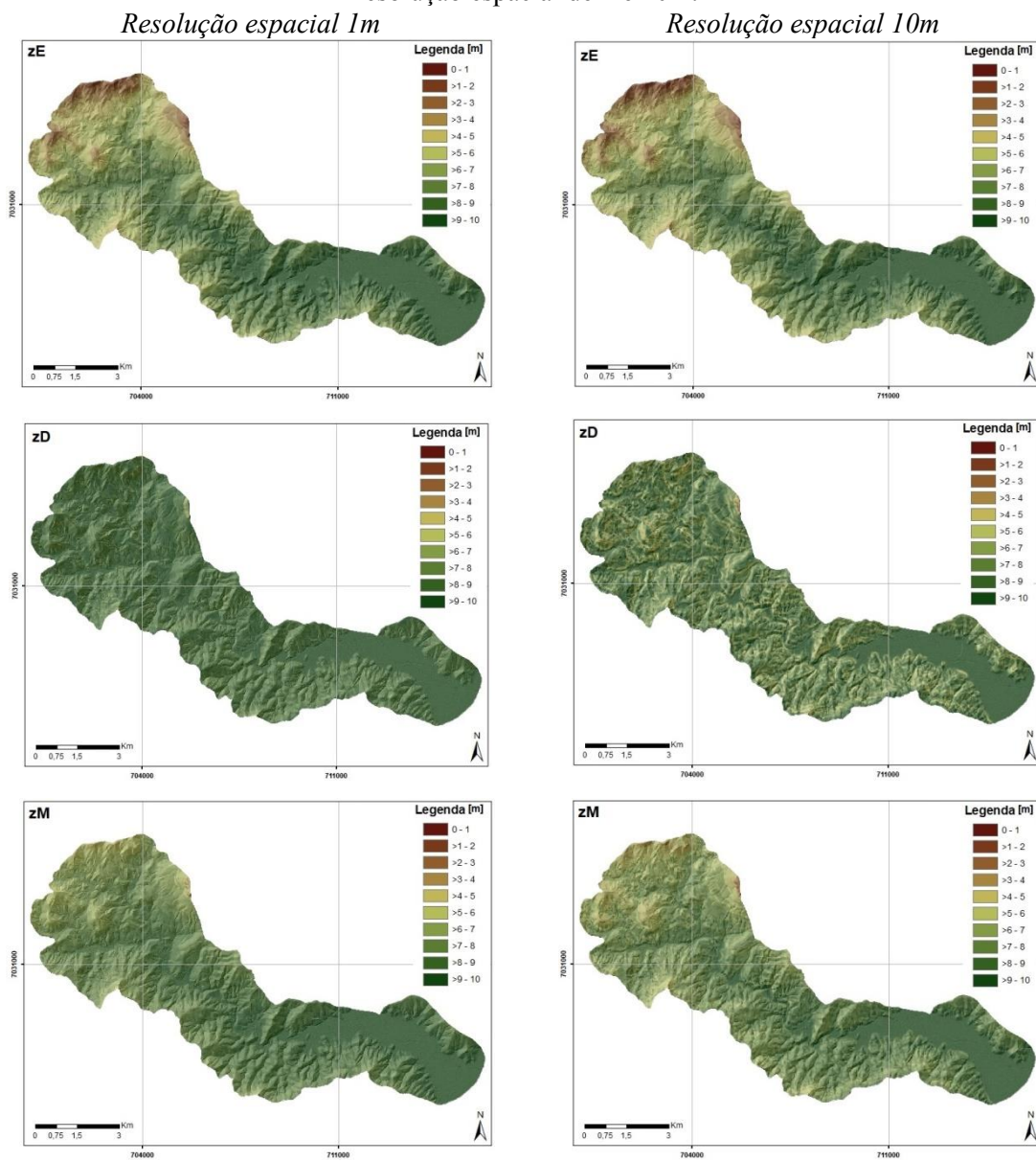
Tabela 23 - Valores do parâmetro de espessura de ruptura do solo utilizado nos cenários para a modelagem com o SHALSTAB.

Cenários		Equação matemática
SEM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS		
2	metros	-
5	metros	-
7	metros	-
10	metros	-
COM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS		
zE	Elevação	Saulnier, Beven e Obled (1997)
zD	Declividade	Saulnier, Beven e Obled (1997)
zM	Média (elevação + declividade)	Silva (2010)

Fonte: elaborado pela Autora.

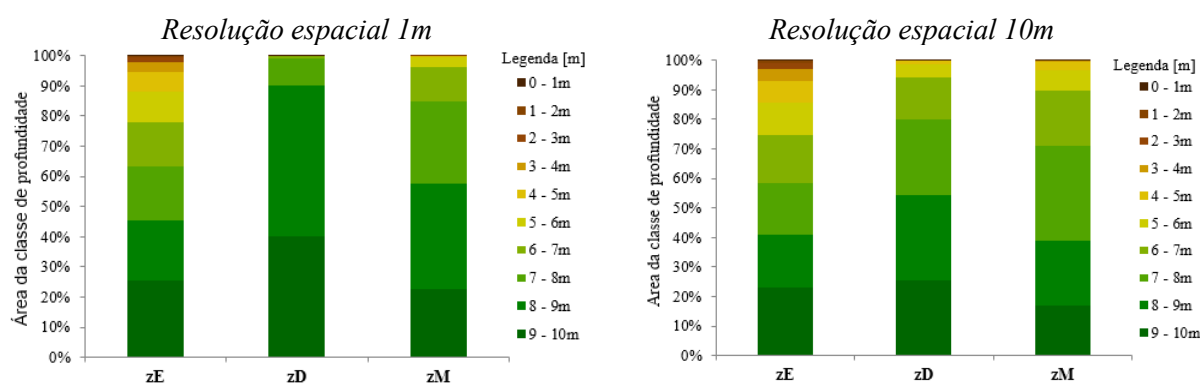
Na Figura 101 são apresentados os mapas referentes aos cenários zE , zD e zM para cada resolução espacial e na Figura 102, por sua vez, os gráficos com a distribuição de cada classe de profundidade de ruptura do solo (z) nos três cenários.

Figura 101 - Cenários com espacialização dos dados de profundidade de ruptura do solo para resolução espacial de 1 e 10m.



Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 102 - Gráficos com a distribuição da profundidade de ruptura do solo nos cenários zE, zD e zM, para resolução espacial de 1 e 10m.



Fonte: elaborado pela Autora.

Observou-se que as maiores profundidades de solo ocorreram em maior área no cenário zD para a resolução espacial de 1m, pois 90,16% da área apresentou profundidade de 8 a 10m. Enquanto os cenários zM, para a resolução espacial de 1m, zD e zM, para a resolução espacial de 10m, apresentaram na maior parte de sua área (mais de 90%) profundidades de ruptura do solo entre 6 e 10m.

Por sua vez, nos cenários elaborados em função da elevação (zE), para as duas resoluções espaciais, ocorreu uma distribuição mais igualitária entre as classes de profundidade do solo. Obteve-se menor profundidade nas áreas de cabeceira da bacia hidrográfica, e solos profundos nas planícies. Isso acontece devido o sedimento das áreas mais altas ser conduzido gravitacionalmente para as áreas mais baixas, o que reduz as profundidades nas áreas mais elevadas e as aumenta nas áreas de baixa altitude.

No cenário zD, em função da declividade, que relaciona a profundidade do solo em termos de propensão a ocorrência de erosão, pois áreas com declividade mais acentuada possuem predisposição a ocorrência de maiores potenciais erosivos, consequentemente, criando profundidades menores de solo, enquanto as áreas de baixa declividade são propícias à deposição, apresentando profundidades maiores de solo.

5.5.3 Modelagem de suscetibilidade a deslizamentos

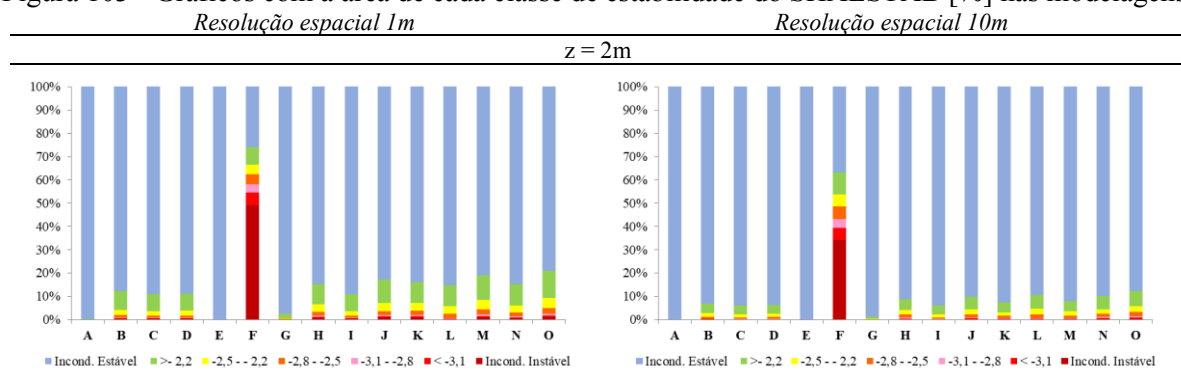
Para a elaboração dos cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foi utilizado o modelo *Shallow Slope Stability Model* (SHALSTAB).

Os dados de entrada para a modelagem referem-se às variáveis topográficas declividade (θ) e área de contribuição por comprimento de contorno unitário (a/b) obtidas dos MDE com resolução espacial de 1 e 10 metros, e às variáveis referentes aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), e peso específico saturado (γ_{sat}). Foram elaborados 15 cenários, 6 sem espacialização dos parâmetros geotécnicos (A a F) e 9 com espacialização (G a O) a partir dos valores disponíveis no banco de dados georreferenciado da área de estudo. Quanto à espessura de ruptura do solo (z), foram utilizados 7 cenários, 4 com valores constantes, de 2, 5, 7 e 10 metros, e 3 nos quais realizou-se a espacialização por meio de equações matemáticas em função da elevação (zE), em função da declividade (zD) e a média entre eles (zM).

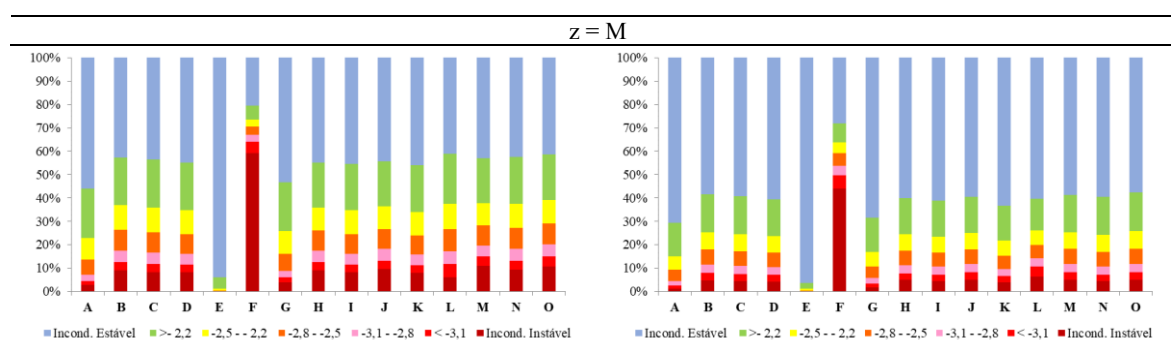
No total, foram geradas 210 modelagens de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, 105 com resolução espacial de 1m e 105 com resolução espacial de 10m, as quais estão apresentadas no Apêndice B. No Apêndice C apresentam-se, ainda, tabelas com os resultados das modelagens em relação à área e área acumulada de cada classe de estabilidade do SHALSTAB, na resolução espacial de 1 e 10m.

A Figura 103 apresenta os gráficos com a porcentagem da área nas sete classes de estabilidade do modelo, em cada modelagem de suscetibilidade a deslizamentos, subdivididos pelos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo (z).

Figura 103 - Gráficos com a área de cada classe de estabilidade do SHALSTAB [%] nas modelagens.







Com base nos gráficos apresentados foi possível observar que, para ambas as resoluções espaciais, a variação dos parâmetros dos solos influencia na ocorrência das classes de estabilidade do SHALSTAB, sobretudo nas extremas: incondicionalmente estável e incondicionalmente instável. Ao comparar todas as modelagens, observou-se uma maior diferença no percentual de ocorrência das classes extremas entre os cenários menos e mais conservadores.

Os cenários sem espacialização geotécnica E (menos conservador) apresentaram a totalidade da área classificada como incondicionalmente estável em $z = 2m$, para ambas as resoluções, e quase a totalidade em $z = 5m$ (99,5 e 99,9% para *pixel* de 1 e 10m, respectivamente), em $z = 7m$ (94,7 e 97,8%), em $z = 10m$ (85,2 e 91,4%), em $z = E$ (94,6 e 97,3%), em $z = D$ (91,8 e 94,7%) e em $z = M$ (94,0 e 96,5%). Isso implica que, mesmo em condições de saturação do solo, a possibilidade de ocorrência de deslizamentos do tipo translacional seria quase nula nesses cenários. Entretanto, esse resultado é incompatível com a situação real da área em estudo.

Em contrapartida, os cenários sem espacialização dos dados geotécnicos F (mais conservador) superestimou as áreas instáveis, apresentando quase metade da área da bacia hidrográfica classificada como incondicionalmente instável pelo modelo: em $z = 2m$ (49,2 e 34,3% para *pixel* de 1 e 10m, respectivamente), em $z = 5m$ (57,3 e 42,0%), em $z = 7m$ (43,5 e 49,2%), em $z = 10m$ (59,7 e 44,6%), em $z = E$ (58,5 e 43,2%), em $z = D$ (59,5 e 44,2%) e em $z = M$ (59,1 e 43,9%).

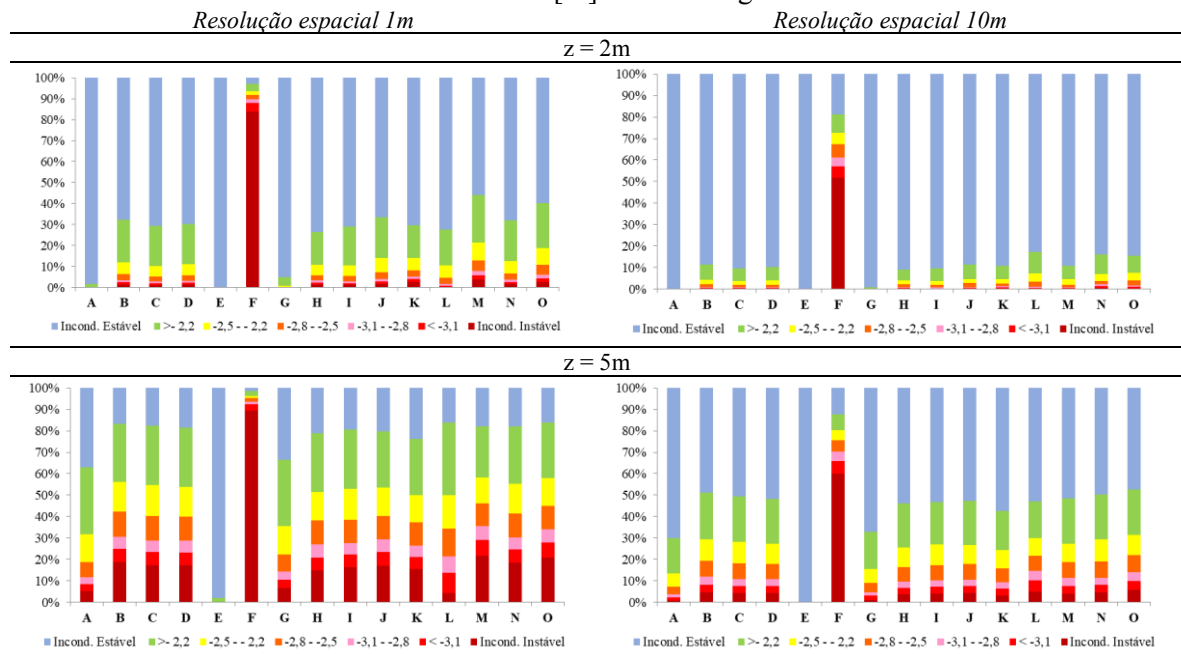
Para a resolução espacial de 1m, os cenários que apresentaram maior porcentagem de área instável (classes incondicionalmente instável e $\text{Log}(q/T) < -3,1$), foram aqueles com espacialização dos dados geotécnicos: O (Interpolação) – 1,8% e M (Média - orientação da

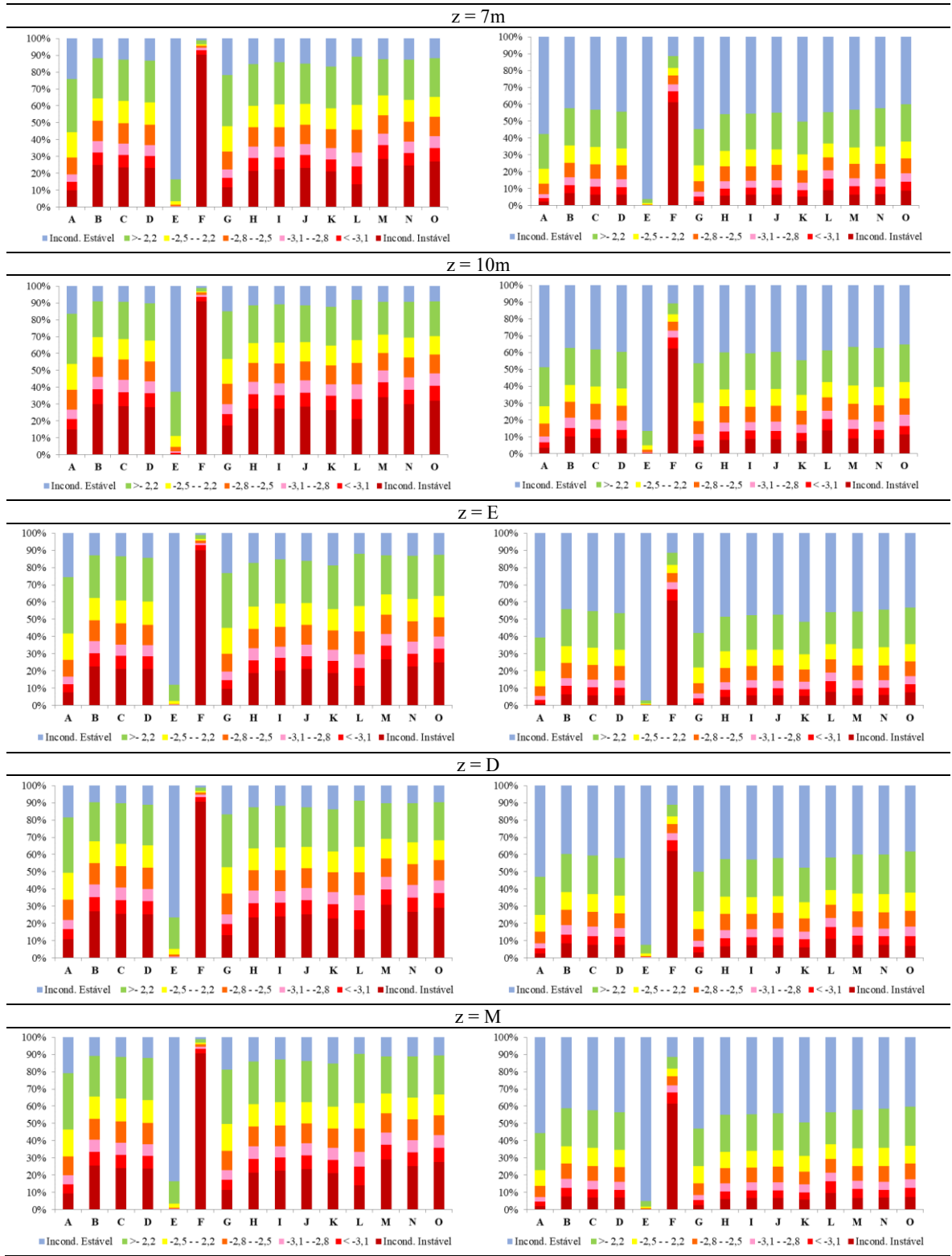
encosta) – 1,6% para z = 2m; O – 10,8% e M – 10,6% para z = 5m; O – 14,4% e M – 14,3% para z = 7m; O e M – 17,5% para z = 10m; O – 13,6% e M – 13,5% para z = E; O e M – 15,8% para z = D; O e M – 14,9% para z = M (com exceção do cenário F - Mais Conservador).

Para a resolução espacial de 10m, por sua vez, os cenários que apresentaram maior porcentagem de área instável (classes incondicionalmente instável e $\text{Log}(q/T) < -3,1$) também foram aqueles com espacialização dos dados geotécnicos: O (Interpolação) – 0,8% e N (Média - forma da encosta) – 0,6% para z = 2m; O – 6,5% e L (Média - declividade) – 6,1% para z = 5m; L – 9,8% e O – 8,9% para z = 7m; L – 12,9% e O – 10,2% para z = 10m; L – 8,9% e O – 8,1% para z = E; L – 11,5% e M – 8,9% para z = D; L – 10,5% e M – 8,2% para z = M (com exceção do cenário F - Mais Conservador).

Ainda, a partir do inventário de cicatrizes dos deslizamentos translacionais ocorridos em novembro de 2008, foram estimadas 526 superfícies de ruptura, as quais foram utilizadas para a análise das modelagens e para validação. São apresentadas, no Apêndice C, as tabelas com a área e área acumulada das superfícies de ruptura em cada classe de estabilidade do modelo SHALSTAB e na Figura 104, os gráficos.

Figura 104 - Gráficos com a área das superfícies de ruptura cada classe de estabilidade do SHALSTAB [%] nas modelagens.





Fonte: elaborado pela Autora.

A partir dos gráficos, observou-se que nas modelagens mais conservadoras, F, um percentual elevado de áreas deslizadas (superfícies de ruptura) localizou-se na classe incondicionalmente instável, 83,9 e 51,8% para *pixel* de 1 e 10m, respectivamente, em $z = 2\text{m}$, 89,4 e 60,0% em $z = 5\text{m}$, 90,3 e 61,3% em $z = 7\text{m}$, 90,9 e 62,6% em $z = 10\text{m}$, 90,1 e 60,9% em $z = E$, 90,7 e 61,9% em $z = D$ e 90,5 e 61,6% em $z = M$. No entanto, esses valores estão diretamente relacionados à elevada ocorrência dessa classe na bacia hidrográfica.

Em contrapartida, nas modelagens menos conservadoras, E, toda a área deslizada em 2008 localizou-se na classe incondicionalmente estável, pois toda a área da bacia hidrográfica foi assim classificada em $z = 2\text{m}$, para ambas as resoluções espaciais; e quase a totalidade da área das superfícies de ruptura nas outras modelagens, em $z = 5\text{m}$ (98,1 e 99,9% para *pixel* de 1 e 10m, respectivamente), em $z = 7\text{m}$ (83,5 e 96,1%), em $z = 10\text{m}$ (62,7 e 86,4%), em $z = E$ (88,0 e 97,0%), em $z = D$ (76,5 e 92,4%) e em $z = M$ (83,7 e 95,0%).

Em relação às modelagens que apresentaram a maior porcentagem de superfícies de ruptura de deslizamentos nas áreas classificadas como instável pelo modelo (classes incondicionalmente instável e $\text{Log}(q/T) < -3,1$), para a resolução espacial de 1m, foram aquelas com espacialização dos dados geotécnicos: M – 5,9% e O – 4,3% para $z = 2\text{m}$; M – 29,1% e O – 27,8% para $z = 5\text{m}$; M – 36,7% e O – 34,9% para $z = 7\text{m}$; M – 43,0% e O – 40,8% para $z = 10\text{m}$; M – 34,8% e O – 33,0% para $z = E$; M – 39,7% e O – 37,7% para $z = D$; M – 37,7% e O – 35,8% para $z = M$. E para a resolução espacial de 10m, os cenários: N – 1,4% e O – 1,1% para $z = 2\text{m}$; L – 10,3% e O – 10,0% para $z = 5\text{m}$; L – 15,9% e O – 14,0% para $z = 7\text{m}$; L – 20,5% e O – 16,3% para $z = 10\text{m}$; L – 14,2% e O – 12,2% para $z = E$; L – 18,0% e M – 12,9% para $z = D$; L – 16,5% e O e B – 12,5% para $z = M$.

Embora sejam mais comuns os deslizamentos translacionais rasos nas encostas brasileiras, no estado de Santa Catarina também ocorreram, em novembro de 2008, deslizamentos translacionais espessos. Em relação ao emprego do modelo matemático SHALSTAB, observou-se bons resultados quando aplicado ao mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos (localizados em maior parte no terço superior das encostas, e locais de maior declividade) e espessos (localizados no terço médio e inferior das encostas, com predomínio em formas côncavas, e com mobilização de grande quantidade de solo).

Contudo, importante pontuar que todas as modelagens apresentaram cicatrizes de deslizamentos localizadas nas áreas classificadas como estáveis pelo SHALSTAB. Essa

inconsistência também foi observada por Gomes *et al.* (2008), Sbroglia (2015), Aristizábal, García e Martínez (2015), Caraméz (2017), Nau (2018) e Christ (2019) em suas pesquisas, utilizando o modelo SHALSTAB. A modelagem que apresentou a menor área de superfícies de ruptura localizada na classe incondicionalmente estável, desconsiderando o cenário F, foi a $L_z = 10\text{m}$ (*pixel* de 1m), com 8,1%. Nesse contexto, infere-se que nenhum dos cenários gerados previu completamente os deslizamentos ocorridos em novembro de 2008.

A ocorrência de cicatrizes na área classificada como incondicionalmente estável pelo modelo matemático empregado pode estar relacionada a diversos fatores, como: as características relacionadas aos pressupostos do SHALSTAB, pois suas funcionalidades não preveem os efeitos após a ocorrência de falha, portanto a capacidade de um ponto propagar sua instabilidade para o entorno não é considerada, a característica dos solos é considerada isotrópica, dessa forma, parâmetros que mudam com a profundidade não são considerados no modelo (PAUL; ABATTI; MICHEL, 2019); a dificuldade na escolha dos métodos utilizados para a regionalização dos dados geotécnicos ao longo da área, a aquisição dos dados de entrada topográficos, como a resolução espacial e, no caso desta pesquisa, a data de aquisição dos dados do aerolevante para a elaboração do MDE, posterior ao desastre de 2008 (após as rupturas os taludes apresentaram alteração em suas geometrias, sobretudo na forma, área de contribuição e declividade); o método de validação e de representação das cicatrizes. Importante destacar ainda a ocorrência de intervenções antrópicas e a complexidade dos deslizamentos, o que ressalta a necessidade de análise em campo, principalmente as encostas com deslizamentos nas áreas consideradas estáveis pelo modelo.

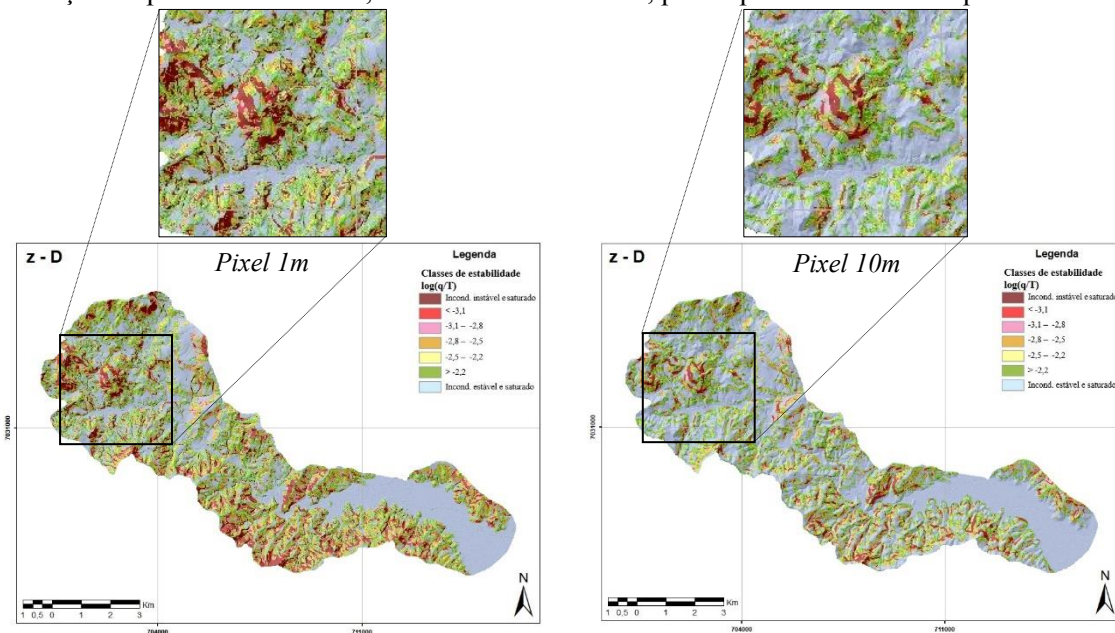
5.5.3.1 *Análise quanto à resolução espacial das modelagens*

No que diz respeito à escala, a sua influência na modelagem foi evidenciada em todas as classes de estabilidade. Cabe destacar que nas modelagens de maior resolução (*pixel* de 1m), as classes intermediárias foram mais bem distribuídas ao longo da área de estudo.

Também se pode observar a influência nas classes extremas, uma vez que nas modelagens de menor resolução espacial (*pixel* de 10m) houve um aumento significativo das áreas de maior estabilidade, demonstrando a suavização na representação do relevo e redução na convergência do fluxo de água.

Isso pode ser visualmente observado no exemplo da Figura 105, na qual são apresentadas as modelagens para o cenário O (Interpolação), $z = D$, nas resoluções de 1 e 10m. Na modelagem de 1m, a classe incondicionalmente estável apresentou um decréscimo de cerca de 16%, e as áreas classificadas como incondicionalmente instáveis um acréscimo de 6%, em relação à modelagem de 10m.

Figura 105 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú nas resoluções espaciais de 1 e 10m, cenário denominado O, para a profundidade de ruptura do solo $z = D$.



Fonte: elaborado pela Autora.

Dietrich e Montgomery (1998), Guimarães *et al.* (2003), Gomes *et al.* (2005) e Sobreira e Souza (2012) citam a influência da resolução do MDE nos resultados da modelagem em suas pesquisas, pois a declividade e a área de contribuição foram suavizadas em modelos de baixa resolução, eliminando valores críticos que são favoráveis a deflagração de deslizamentos. Isso foi observado na análise entre os mapas de declividade produzidos nas resoluções espaciais de 1 e 10m, pois as áreas das classes de baixa declividade (até 20°) foram superestimadas na resolução espacial de 10m em relação à de 1m, aumentando as áreas classificadas como estáveis, e subestimadas após 20°, ocorrendo uma inversão entre as escalas.

Nesse sentido, em todas as modelagens observou-se que o desempenho do modelo reduziu na escala 1:50.000, uma vez que apresentaram uma elevada área de superfícies de ruptura nas classes estáveis. Em média, a diferença entre as áreas deslizadas localizadas na

classe incondicionalmente estável, entre as duas resoluções, foi de cerca de 30% (com exceção do cenário $z = 2\text{m}$, que foi de 16%). Enquanto a diferença entre as áreas deslizadas localizadas na classe incondicionalmente instável, entre as duas resoluções, foi de 17,5% em $z = 10\text{m}$, 16% em $z = D$, 15% em $z = M$ e $z = 7\text{m}$, 14% em $z = E$, 11,6% em $z = 5\text{m}$ e de apenas 3,3% em $z = 2\text{m}$. Dessa forma, na escala de maior resolução espacial (1:10.000) os resultados apresentaram-se mais coerentes com a situação da área de estudo.

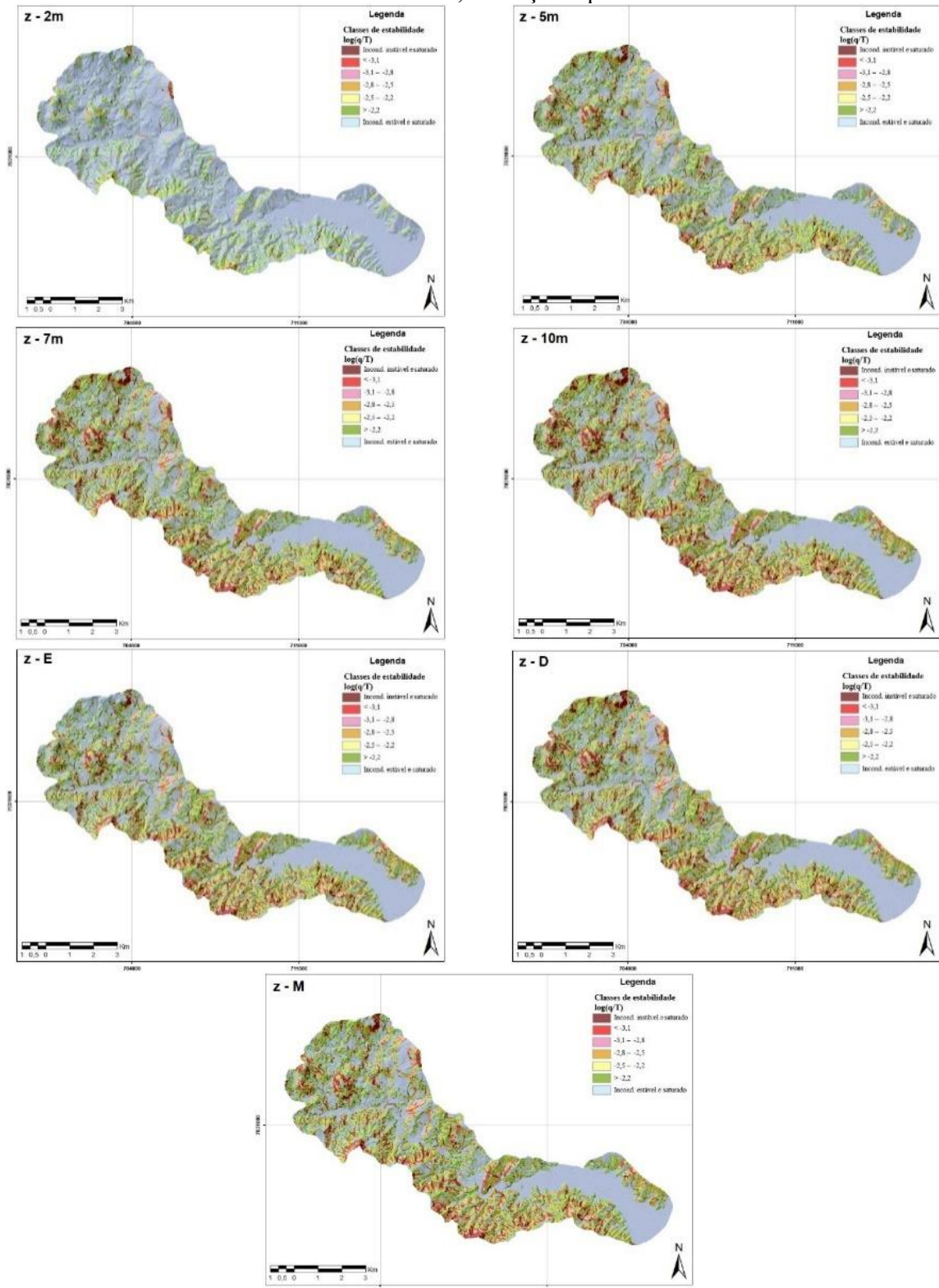
5.5.3.2 *Análise quanto aos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo*

No geral, como era esperado, as áreas classificadas como instáveis pelo modelo foram se ampliando, e as estáveis se reduzindo, na medida em que as profundidades de ruptura do solo foram aumentando (de 2 a 10 metros). Em relação aos cenários com os valores de z espacializado, os resultados foram muito próximos, sendo que o cenário $z = D$, em função da declividade, apresentou a maior porcentagem de áreas instáveis, seguido pelo $z = M$, média, e $z = E$, aquele em função da elevação.

Destaca-se a ocorrência de variação significativa dos resultados nos cenários com a profundidade de ruptura do solo constante, sobretudo nas classes extremas, sendo que o cenário $z = 2\text{m}$ apresentou uma maior variação em relação às outras profundidades, para ambas as resoluções espaciais. Ainda, em 2 modelagens (E, com *pixel* de 1 e 10m), utilizando $z = 2\text{m}$, toda a área da bacia hidrográfica foi classificada como incondicionalmente estável.

De forma exemplificativa, na Figura 106 são apresentadas as modelagens de suscetibilidade a deslizamentos obtidas pelo SHALSTAB para o cenário M nas diferentes profundidades de ruptura do solo (z), na resolução espacial de 1m. Nas referidas modelagens, a classe incondicionalmente estável teve uma redução de 30% de $z = 2\text{m}$ para $z = 5\text{m}$ (81% e 51%, respectivamente). Em contrapartida, a diferença de $z = 5\text{m}$ para $z = 7\text{m}$ foi de 6,4%, e de $z = 7\text{m}$ para $z = 10\text{m}$ de 4,7%. Essa grande redução de áreas estáveis em relação a menor profundidade de solo e $z = 5\text{m}$, e depois uma menor redução conforme o valor de z foi aumentado, também foi observada para as outras modelagens.

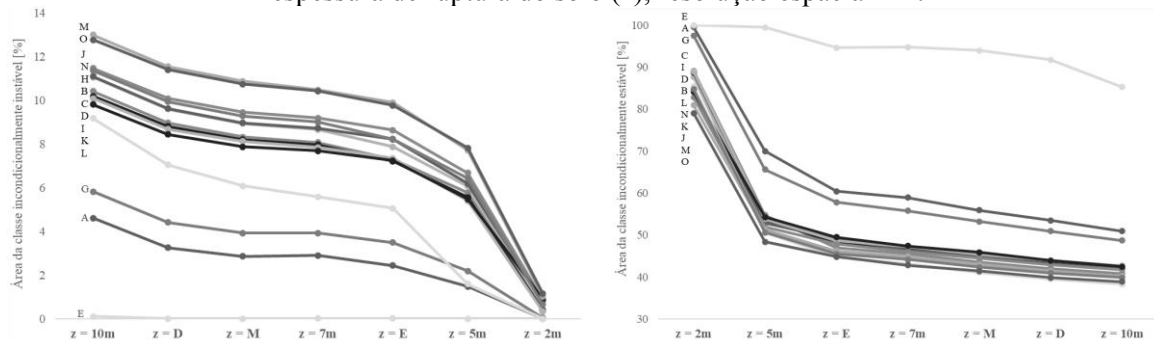
Figura 106 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, cenário denominado M, resolução espacial de 1m.



Fonte: elaborado pela Autora.

A variação da classe incondicionalmente instável entre as diferentes profundidades de análise do solo não foi tão expressiva. De maneira geral, foram observadas em todas as modelagens com resolução de 1m, e na maior parte das modelagens com resolução de 10m, que a maior porcentagem de áreas instáveis foi decrescente da seguinte forma: $z = 10m$, $z = D$, $z = M$, $z = 7m$, $z = E$, $z = 5m$ e $z = 2m$, conforme se pode observar nos gráficos das Figuras 107 e 108. Assim como, a maior porcentagem de áreas estáveis foi decrescente da seguinte forma: $z = 2m$, $z = 5m$, $z = E$, $z = 7m$, $z = M$, $z = D$ e $z = 10m$, para a resolução de 1m; e da seguinte forma: $z = 2m$, $z = 5m$, $z = D$, $z = E$, $z = 10m$, $z = M$ e $z = 7m$, para a resolução de 10m.

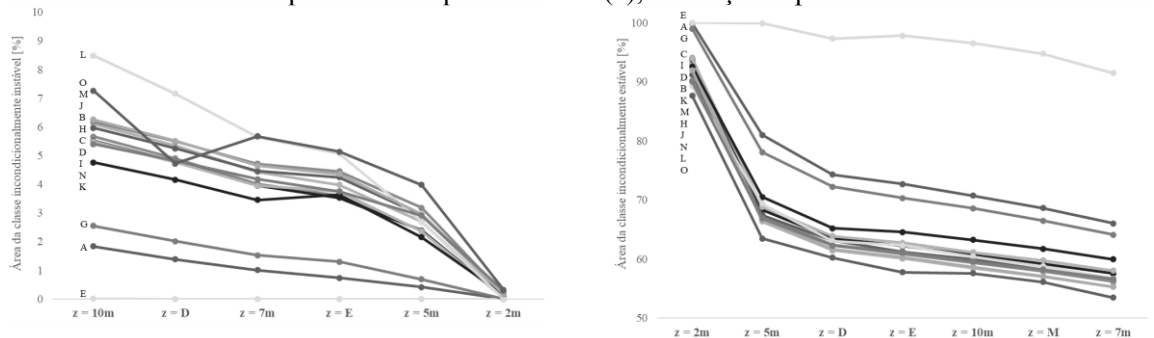
Figura 107 - Variação da área das classes extremas de estabilidade nos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo (z), resolução espacial 1m.



Obs.: Para uma melhor visualização, foram desconsiderados os valores do cenário F.

Fonte: elaborado pela Autora.

Figura 108 - Variação da área das classes extremas de estabilidade nos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo (z), resolução espacial 10m.



Obs.: Para uma melhor visualização, foram desconsiderados os valores do cenário F.

Fonte: elaborado pela Autora.

Em relação ao inventário de cicatrizes dos deslizamentos, os cenários $z = 10m$ e $z = D$ foram os que apresentaram a maior porcentagem de área das superfícies de ruptura localizadas na classe incondicionalmente instável e a menor área na classe incondicionalmente estável.

5.5.3.3 *Análise quanto aos cenários de espacialização dos parâmetros dos solos*

Foram utilizados 15 cenários em relação aos parâmetros geotécnicos como dado de entrada no modelo SHALSTAB. Nos denominados “sem espacialização dos parâmetros dos solos” foi empregado um único valor de c , ϕ e γ_{sat} para toda a área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, por meio de média aritmética em A (dados da literatura) e B (dados da área de estudo), de média ponderada em C (polígonos das unidades geotécnicas) e D (polígonos dos modelados de relevo), e dos dados menos (E) e mais conservadores (F). Nos denominados “com espacialização dos parâmetros dos solos”, a espacialização foi realizada por meio dos polígonos das unidades geotécnicas em G (dados da literatura) e em H (dados da área de estudo), dos modelados de relevo em I, de ambos em J, por intervalo de altitude em K, por intervalo de declividade em L, por orientação da encosta em M, por forma da encosta em N e por interpolação dos dados em O.

De modo geral, observou-se que a variação dos parâmetros dos solos influencia na ocorrência das sete classes de estabilidade do modelo, sobretudo nas extremas: incondicionalmente estável e incondicionalmente instável. Isso ficou evidenciado em ambas as escalas. Logo, a definição desses dados de entrada para a modelagem mostra-se uma etapa importante na análise de suscetibilidade.

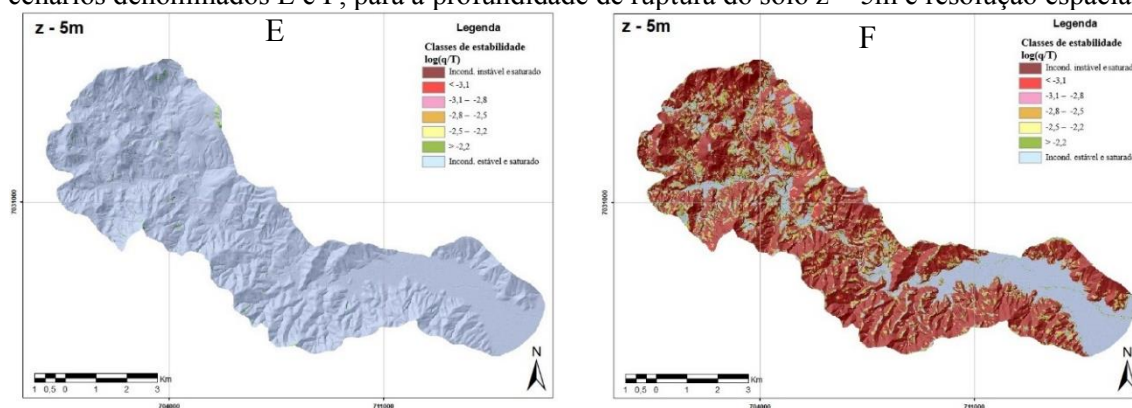
Em relação à área da classe incondicionalmente estável, ocorreu uma maior variação nos cenários sem espacialização dos dados (A a F), porém, a porcentagem dessa classe nos cenários B, C e D foram mais próximas. Para os cenários com espacialização, os valores das áreas das classes incondicionalmente estável de M e O apresentaram-se similares.

Também foi observado que os cenários elaborados por meio da média dos dados levantados na literatura, para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, apresentaram valor elevado de áreas estáveis em relação às modelagens. Para a espessura do solo de 2 metros, por exemplo, quase a totalidade da área em estudo foi classificada como incondicionalmente estável, tanto para os cenários sem espacialização (A) como para os cenários com espacialização (G) dos parâmetros geotécnicos da literatura.

Em relação à área da classe incondicionalmente instável, por sua vez, de maneira geral, a maior porcentagem de área dessa classe foi decrescente nos cenários da seguinte forma: F, M, O, J, N, H, B, C, D, I, K, L, G, A, E.

A variação mais discrepante entre a área das classes extremas pode ser observada nos cenários menos e mais conservadores, E e F, respectivamente. De maneira ilustrativa, são apresentadas na Figura 109 as modelagens para a profundidade de ruptura do solo $z = 5\text{m}$, na resolução espacial de 1m , desses dois cenários. Enquanto 99,5% da bacia hidrográfica foi classificada como incondicionalmente estável em E, apenas 21,5% foi assim classificada em F; e para a classe incondicionalmente instável, abrangeu 57,3% da área de estudo em F e 0% no cenário E.

Figura 109 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, cenários denominados E e F, para a profundidade de ruptura do solo $z = 5\text{m}$ e resolução espacial 1m .



Fonte: elaborado pela Autora.

Em relação ao inventário de cicatrizes dos deslizamentos, os resultados que apresentaram mais áreas deslizadas localizadas na classe instável foram os cenários F, M, O, N e B para a resolução de 1m , e F, L, O e B para a resolução de 10m . E os que apresentaram mais áreas deslizadas localizadas na classe estável foram E, A, G e K para ambas as resoluções.

Entretanto, observou-se que os cenários mais e menos conservadores não apresentaram resultados satisfatórios. No cenário E (menos conservador), a maior parte das superfícies de ruptura das cicatrizes localizaram-se na classe incondicionalmente estável, pois quase toda a área da bacia hidrográfica foi assim classificada. Em contrapartida, no cenário F (mais conservador) um elevado percentual de superfícies de ruptura localizou-se na classe incondicionalmente instável, contudo, esse resultado encontra-se diretamente relacionado à grande abrangência dessa classe na área de estudo.

Visto que a eficácia do SHALSTAB está relacionada a sua capacidade de prever os locais onde ocorreram os deslizamentos em um baixo percentual de áreas classificadas como

instáveis, foi realizada a validação das modelagens para identificação da que melhor se ajustou às cicatrizes mapeadas na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.

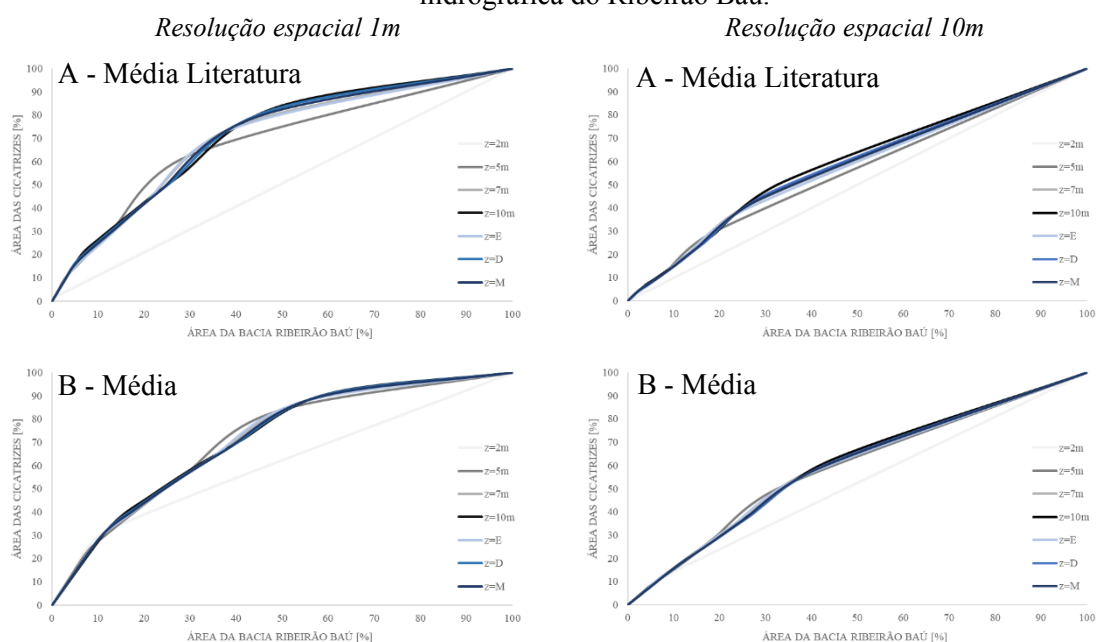
5.5.4 Validação das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos

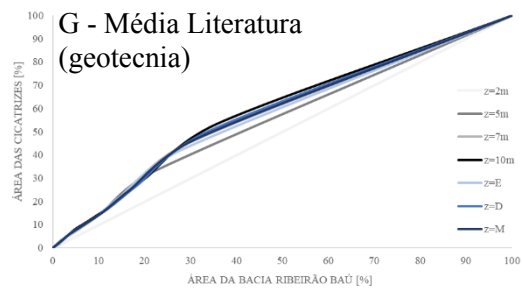
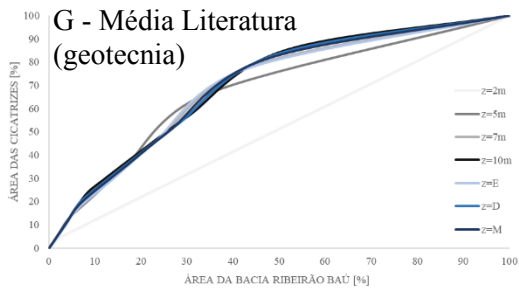
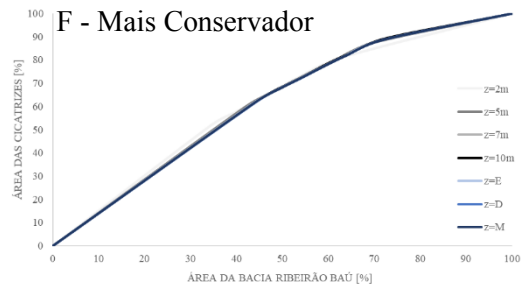
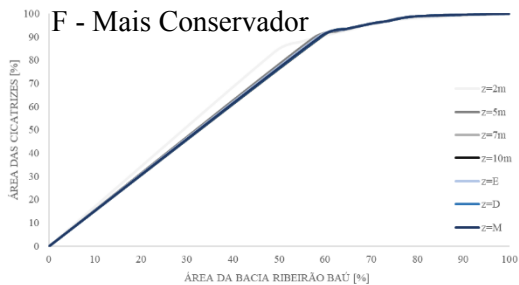
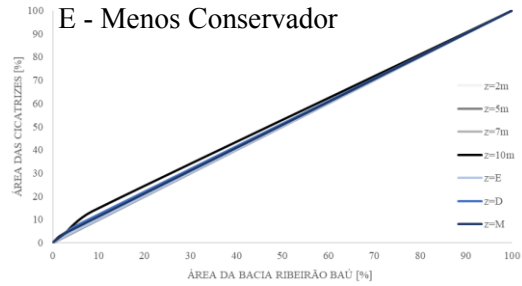
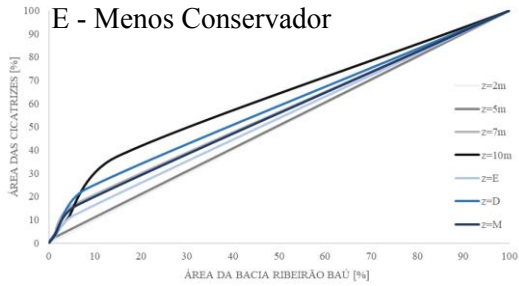
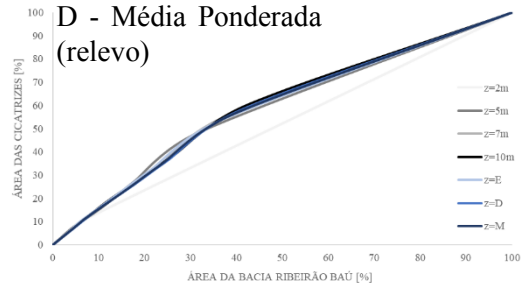
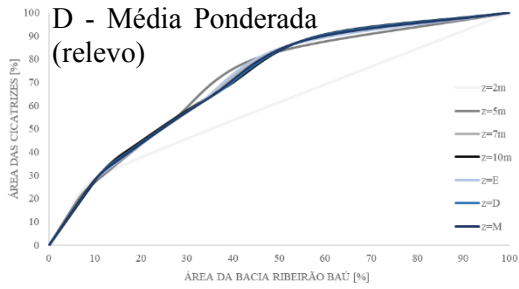
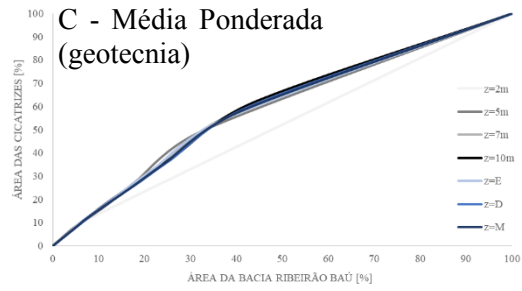
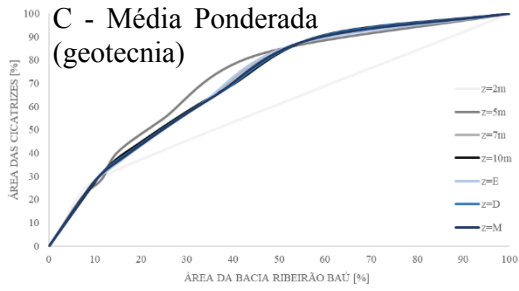
A capacidade preditiva dos modelos de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos foi avaliada por meio da elaboração das curvas de predição e da determinação da respectiva Área Abaixo da Curva (AAC).

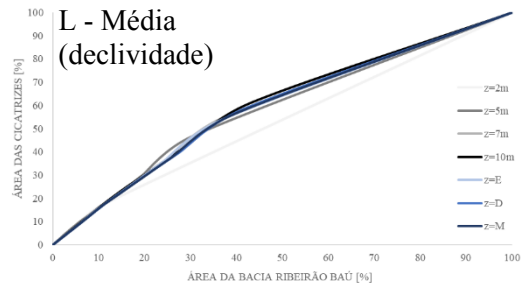
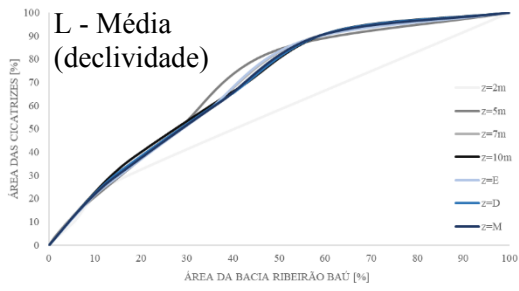
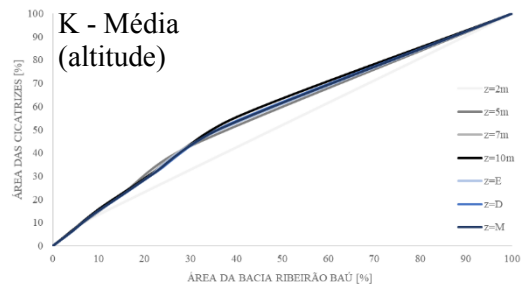
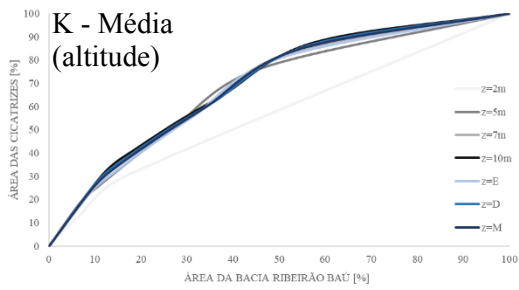
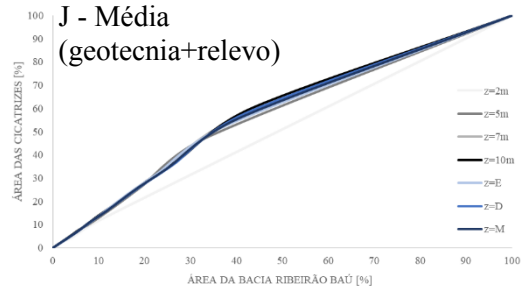
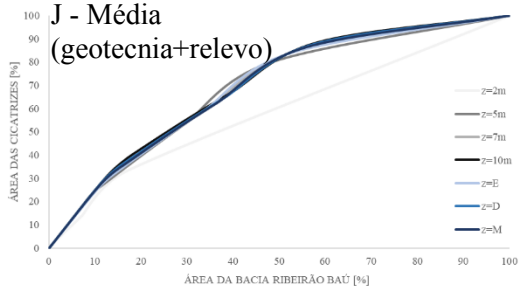
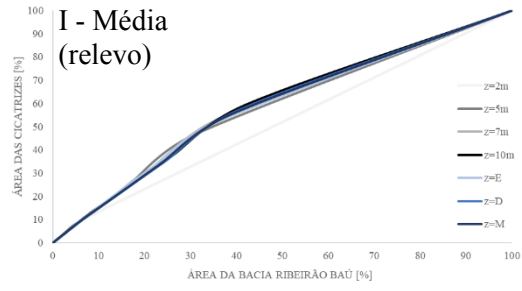
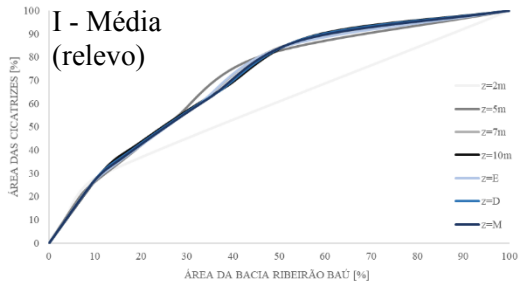
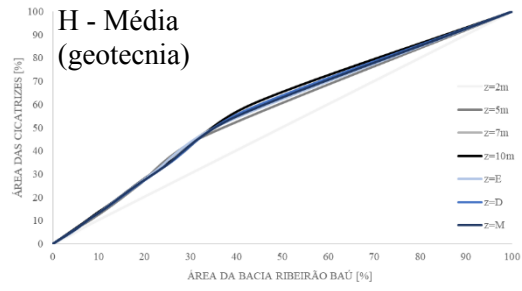
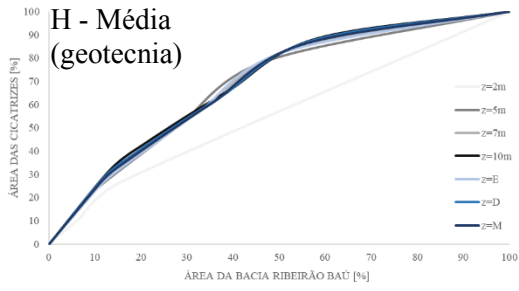
Essas curvas relacionam a porcentagem acumulada de cada classe de estabilidade presente na área de estudo (eixo das abcissas) com a porcentagem acumulada dos deslizamentos presentes em cada uma dessas classes (eixo das ordenadas), ambos os eixos se apresentam de maneira decrescente, iniciando pela classe mais instável.

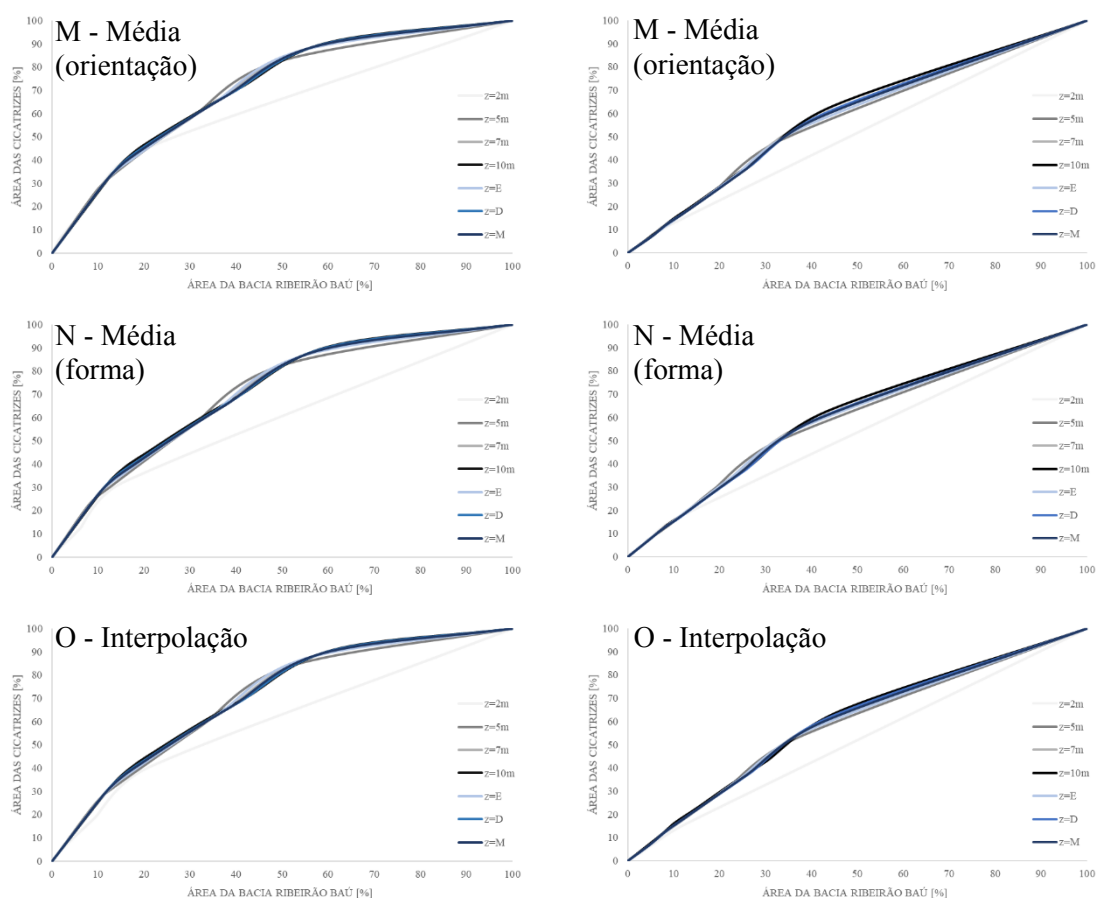
A Figura 110 apresenta as curvas de predição para todas as modelagens realizadas nesta pesquisa divididas por cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos (A a O) e por resolução espacial (*pixel* de 1 e 10m).

Figura 110 - Curvas de predição das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.









Fonte: elaborado pela Autora.

Em uma análise visual, dentre as curvas elaboradas, quanto mais íngreme for a curva, ou seja, a que se distanciar do eixo das abcissas e alcançar a proporção de 100% dos *pixels* deslizados mais rapidamente é a que representa o cenário de maior capacidade preditiva de deslizamentos na área de estudo. Uma curva coincidente com uma diagonal, partindo do 0 até o 100%, equivale a uma predição totalmente aleatória, como é o caso de parte das curvas dos cenários E, na resolução espacial de 10m, e das curvas com $z = 2m$ nos cenários A e G, para ambas as resoluções.

Ainda, na Figura 110 pode-se observar a baixa capacidade preditiva das modelagens elaboradas com resolução espacial de 10m em relação às elaboradas com resolução de 1m.

Devido ao elevado número de modelagens realizadas, com o intuito de comparar os diferentes resultados gráficos e definir os cenários de maior capacidade preditiva, recorreu-se ao método quantitativo denominado Área Abaixo da Curva (AAC) ou *Area Under the Curve* (AUC).

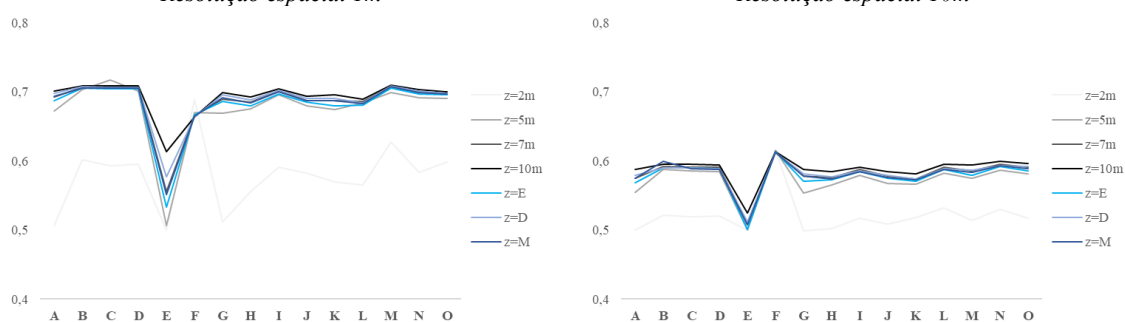
Dessa forma, foi calculada a AAC das curvas de predição de todas as modelagens, que se encontram apresentadas no Apêndice D. O valor de AAC varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade da modelagem; valor de AAC de 0,5, expresso pela linha diagonal da curva de predição, relaciona-se a uma classificação aleatória; e valores abaixo de 0,5 evidenciam modelos com uma capacidade preditiva menor que o aleatório, devendo ser desconsiderados.

A variação dos valores de AAC calculados com base nas curvas de predição das modelagens foi de 0,500 a 0,717 para a resolução espacial de 1m, e de 0,499 a 0,616 para a resolução espacial de 10m. Nos gráficos da Figura 111 é apresentada a variação dos valores de AAC para as modelagens, por resolução espacial.

Observa-se que, para todas as profundidades de ruptura, os cenários E foram os que apresentaram os menores valores de AAC para ambas as resoluções. Para o referido cenário, a média entre os valores foi de 0,548 e 0,508 para as resoluções de 1 e 10m, respectivamente. Em contrapartida, os cenários que apresentaram os maiores valores de AAC foi o M, média de 0,695, e o F, média de 0,614, para as resoluções de 1 e 10m, respectivamente.

Ainda, é possível observar que os cenários com a profundidade de ruptura de 2 metros ($z = 2m$) foram os que apresentaram valores de AAC mais variáveis, sendo que os menores valores foram para os cenários E (0,500) e G (0,499) e os maiores para os cenários F (0,689 e 0,616) para as resoluções de 1 e 10m, respectivamente.

Figura 111 - Variação dos valores de AAC nas modelagens para a resolução espacial de 1m e de 10m.



Fonte: elaborado pela Autora.

Para a resolução espacial de 1m, fazendo-se uma análise por cenário de espacialização dos parâmetros dos solos, o M foi o que apresentou mais valores de AAC acima dos demais, sendo que apenas para $z = 2m$ e $z = 5m$ outros cenários apresentaram valores acima; e por

profundidade do solo (z), os cenários modelados com o valor fixo de 10m de profundidade de ruptura foram os que apresentaram os maiores valores de AAC (em 13 cenários, média de AAC 0,693).

Para a resolução espacial de 10m, o cenário F apresentou os maiores valores de AAC para todas as profundidades de ruptura; enquanto os cenários com profundidade de ruptura fixa em 10m foram os que apresentaram maiores valores de AAC (em 13 cenários, média de AAC 0,588).

Em relação às duas escalas de análise, observou-se que os resultados para a maior escala (*pixel* de 1m) foram superiores aos de menor escala (*pixel* de 10m), a diferença entre as médias de AAC foi de 0,10, sendo que a média dos valores de AAC para os cenários com resolução de 1m foi de 0,669 e para os cenários com resolução de 10m foi de 0,572.

Como os dados topográficos de entrada para execução das modelagens derivam exclusivamente do MDE, sua qualidade é crucial para obtenção de cenários com maior capacidade preditiva, dessa forma, conclui-se que, embora o MDE com resolução espacial de 10m (escala 1:50.000) seja anterior a ocorrência dos movimentos de massa, seu uso para análise de suscetibilidade a deslizamentos com o SHALSTAB, em detrimento do MDE com escala maior (1:10.000) elaborado após 2008, não é indicado por reduzir a eficiência do modelo.

A escala deve ser tratada como uma questão metodológica fundamental na análise de um fenômeno a ser estudado. Contudo, a disponibilidade de dados topográficos de domínio público no Brasil, em escala de detalhe, ainda é restrita, sendo que diversos estados brasileiros possuem dados cartográficos em escala 1:50.000 ou menores, o que não inviabiliza a análise de suscetibilidade (GOMES *et al.*, 2005). Nesses casos, recomenda-se que as modelagens sejam empregadas em análises preliminares, visto a necessidade de uma escala mais refinada para a determinação das áreas críticas a deflagração de deslizamentos. Para pesquisas realizadas no Estado de Santa Catarina que, a princípio, possuem disponibilizados os dados cartográficos na escala 1:50.000 (pelo IBGE) e 1:10.000 (pela SDE/SC), sugere-se um esforço na aquisição de informações topográficas de maior resolução e elaboradas anteriormente à ocorrência dos movimentos de massa, principalmente, levantamentos a nível local como os realizados pelos municípios ou, quando analisada(s) encosta(s), recomenda-se a utilização de veículo aéreo não tripulado (drone) para a aquisição dos dados altimétricos em maior detalhe.

No Apêndice E é apresentada a hierarquização dos 210 cenários modelados em relação aos valores de AAC obtidos das curvas de predição, por ordem do melhor classificado, ou seja, com o maior valor de AAC, para o de pior classificação, com menor valor de AAC. As posições variaram de 1ª (AAC 0,717) a 197 (AAC 0,499).

Os cenários mais bem classificados, todos com resolução espacial de 1m, foram: 1ª posição cenário C z=5m (1m) – AAC 0,7167; 2ª posição M z=10m (1m) – AAC 0,7099; 3ª posição B z=10m (1m) – AAC 0,7091; 4ª posição C z=10m (1m) e M z=D (1m) – AAC 0,7084; e 5ª posição D z=10m (1m) – AAC 0,7083. Esses seis cenários localizados até a 5ª posição apresentaram variação da AAC de 0,008 (de 0,7167 a 0,7083), enquanto os 12 cenários, localizados até a 10ª posição, apresentaram variação de 0,010 (de 0,7167 a 0,7067).

Os cenários localizados nas últimas posições foram: posição 193 cenário E z=E (10m) – AAC 0,5013; posição 194 E z=2m (10m) e E z=2m (1m) – AAC 0,5000; posição 195 E z=5m (10m) – AAC 0,4998; posição 196 A z=2m (10m) – AAC 0,4996; e posição 197 G z=2m (10m) – AAC 0,4991.

Em relação à resolução espacial, o cenário mais bem classificado com *pixel* de 10m está na 82ª posição, F z=2m (10m), com um valor de AAC de 0,616.

Foi realizada uma análise em relação aos cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos (A a O), de superfície de ruptura (z = 2, 5, 7, 10m, z = E, z = D e z = M) e resolução espacial, entre as modelagens localizadas nas 5 e nas 10 primeiras e últimas posições, apresentadas nas Tabelas 24 e 25, respectivamente.

Entre as modelagens com valor de AAC localizadas nas 5 primeiras posições, os cenários sem espacialização dos dados geotécnicos (B, C, D) elaborados por meio da média aritmética entre os valores dos parâmetros, e da média ponderada dos valores pelos polígonos das unidades geotécnicas e pelos polígonos dos modelados de relevo foram os que apresentaram melhores resultados, com 4 cenários entre os 6 primeiros na hierarquização de AAC.

Em relação à profundidade da superfície de ruptura, os cenários sem espacialização dos dados z = 10m apresentaram 4 modelagens nas 5 primeiras posições. O cenário com espessura do solo (z) inversamente proporcional ao declive (z = D) localizou-se na 5ª posição. Em relação à resolução espacial das modelagens, todos os 5 primeiros colocados na hierarquização de AAC possuem *pixel* de 1m.

Em oposição, entre as modelagens com valor de AAC localizadas nas 5 últimas posições, 4 delas são o cenário E, sem espacialização dos dados geotécnicos, denominado de menos conservador, pois foram atribuídos os maiores valores de c e ϕ e o menor valor de γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú. Além disso, 4 modelagens localizadas nas 5 últimas posições são os cenários sem espacialização dos dados de profundidade do solo, $z = 2\text{m}$. Em relação à resolução espacial, 5 cenários entre os 6 com menor valor de AAC possuem *pixel* de 10m.

Tabela 24 - Modelagens com valor de AAC localizadas nas 5 primeiras e 5 últimas posições da hierarquização – Apêndice E.

5 primeiras posições = 6 cenários			5 últimas posições = 6 cenários		
Quantidade	Cenário	Posição	Quantidade	Cenário	Posição
2x	C	1 ^a , 4 ^a	4x	E	193, 194, 195
	M	2 ^a , 4 ^a		A	196
1x	B	3 ^a	1x	C	197
	D	5 ^a			
4x	$z = 10\text{m}$	2 ^a , 3 ^a , 4 ^a , 5 ^a	4x	$z = 2\text{m}$	194, 196, 197
1x	$z = 5\text{m}$	1 ^a	1x	$z = E$	193
	$z = D$	4 ^a		$z = 5\text{m}$	195
6x	Resolução 1m	1 ^a a 5 ^a	1x	Resolução 1m	194
0	Resolução 10m	-	5x	Resolução 10m	193, 194, 195, 196, 197

Fonte: elaborado pela Autora.

Em relação às 10 primeiras posições do valor de AAC, os cenários sem espacialização dos dados geotécnicos (B, C, D) e com espacialização dos dados (M) foram os mais bem colocados na hierarquização (Apêndice E).

Os cenários com profundidade de ruptura do solo sem espacialização dos dados, $z = 10\text{m}$, e com espacialização, $z = D$, se apresentaram em maior número dentre os 10 primeiros colocados, 4 de cada. Em relação à resolução espacial das modelagens, todos os 10 primeiros colocados na hierarquização de AAC possuem *pixel* de 1m.

Em relação às últimas posições, os cenários sem espacialização dos dados E (menos conservador), na profundidade de solo constante $z = 2\text{m}$ e com resolução espacial de 10m se apresentaram em maior número dentre os 10 cenários mais mal colocados na hierarquização de AAC (Apêndice E), conforme se pode observar no Tabela 25.

Tabela 25 - Modelagens com valor de AAC localizadas nas 10 primeiras e 10 últimas posições da hierarquização – Apêndice E.

10 primeiras posições = 12 cenários			10 últimas posições = 11 cenários		
Quantidade	Cenário	Posição	Quantidade	Cenário	Posição
4x	M	2 ^a , 4 ^a , 6 ^a , 8 ^a	7x	E	188, 189, 190, 193, 194, 195
3x	C	1 ^a , 4 ^a , 10 ^a	2x	A	191, 196
	B	3 ^a , 7 ^a , 10 ^a		1x	H
2x	D	5 ^a , 9 ^a	1x	G	197
4x	z = 10m	2 ^a , 3 ^a , 4 ^a , 5 ^a	6x	z = 2m	191, 192, 194, 196, 197
	z = D	4 ^a , 7 ^a , 9 ^a , 10 ^a	2x	z = 5m	190, 195
2x	z = 7m	6 ^a , 10 ^a	1x	z = 7m	188
1x	z = 5m	1 ^a	1x	z = M	189
	z = M	8 ^a		z = E	193
12x	Resolução 1m	1 ^a a 10 ^a	3x	Resolução 1m	190, 191, 194
0	Resolução 10m	-	8x	Resolução 10m	188, 189, 192, 193, 194, 195, 196, 197

Fonte: elaborado pela Autora.

Por fim, fazendo-se uma análise entre os cenários localizados nas 25 primeiras posições da hierarquização (totalizando 27 cenários), até a 19^a colocação (21 cenários) ocorrem os B, C, D (6 vezes cada) e M (5 vezes); entre os 25 com maior valor de AAC, o cenário z = 10m aparece 6 vezes, os cenários z = D e z = 7m, 5 vezes, os cenários z = M e z = E, 4 vezes, e o cenário z = 5m, 3 vezes. Todos eles possuem 1m de resolução espacial. Em relação às últimas 25 posições (totalizando 26 cenários), o cenário E aparece 11 vezes e os cenários A e G 2 vezes cada; o cenário z = 2m aparece 17 vezes e a resolução espacial de 10m, 20 vezes.

A partir dos valores de AAC se pôde classificar as modelagens conforme as classes definidas por Thuiller *et al.* (2010). Destaca-se que mesmo na eventual presença de um modelo preditivo perfeito, o valor de AAC igual a 1 não será obtido numa curva de predição, uma vez que, por exemplo, se o somatório da área deslizada representa 10%, será necessário, no mínimo, 10% da área de estudo para validar esses mesmos deslizamentos.

Para a bacia hidrográfica do Ribeirão Báu, a área total do MDE com resolução espacial de 1m é composta por 62.652.306 *pixels*, dos quais 794.326 (1,27%) correspondem às superfícies de ruptura de deslizamentos; enquanto a área do MDE com resolução espacial de 10m corresponde a 626.525 *pixels*, dos quais 7.901 (1,26%) são áreas deslizadas.

Nesse sentido, realizou-se a reclassificação dos valores propostos por Thuiller *et al.* (2010) por meio do cálculo da AAC máxima, obtendo-se o valor de 0,994, para ambas as resoluções. Na Tabela 26, com base nos valores de AAC ajustados, é possível observar que 45 modelagens foram classificadas como aceitável, 59 como fraca e 106 como muito fraca.

Tabela 26 - Classificação das modelagens a partir dos valores de Área Abaixo da Curva (AAC).

Thuiller <i>et al.</i> (2010)	Reclassificado	Classificação	Número de Modelagens
> 0,90 - 1,00	> 0,894 - 0,994	Excelente ou Extremamente Satisfatória	0
>0,80 - 0,90	> 0,794 - 0,894	Boa ou Muito Satisfatória	0
>0,70 - 0,80	> 0,694 - 0,794	Aceitável ou Razoável	45
>0,60 - 0,70	> 0,594 - 0,694	Fraca	59
0,50 - 0,60	0,494 - 0,594	Muito Fraca	106

Fonte: elaborado pela Autora.

5.5.5 Cenários com maior capacidade preditiva

Conforme anteriormente descrito, 6 modelagens apresentaram os 5 maiores valores de AAC. Dessa forma, com o intuito de definir aquelas mais bem ajustadas aos deslizamentos ocorridos em 2008, foi realizada a comparação por meio do cálculo do Índice de Acerto (IA), Índice de Erro (IE) e a taxa IA/IE propostos por Sorbino, Sica e Cascini (2010).

O IA representa a porcentagem de área classificada como instável pelo modelo (classes incondicionalmente instável e $\text{Log}(q/T) < -3,1$) que coincide com a área das superfícies de ruptura nas cicatrizes dos deslizamentos; e o IE representa a razão percentual entre as áreas definidas como instáveis que não coincidem com a área de ocorrência das superfícies de ruptura e as áreas da bacia hidrográfica que não foram afetadas por deslizamentos. Dessa forma, quanto maior o valor de IA, e menor o valor de IE, melhor é o resultado da modelagem.

Na Tabela 27 são apresentados os valores de IA, IE e a relação IA/IE para as modelagens com maior capacidade preditiva dos deslizamentos, e a respectiva hierarquização.

Tabela 27 - Valores de IA, IE e IA/IE para as modelagens com maior capacidade preditiva.

Cenário	IA [%]	Hierarquização	IE [%]	Hierarquização	IA/IE	Hierarquização
C z=5m (1m)	23,44	6°	7,93	1°	2,95	1°
D z=10m (1m)	36,33	5°	13,73	2°	2,65	2°
C z=10m (1m)	37,08	4°	14,13	3°	2,62	3°
B z=10m (1m)	38,72	3°	14,96	4°	2,59	4°
M z=D (1m)	39,67	2°	15,50	5°	2,56	5°
M z=10m (1m)	42,99	1°	17,16	6°	2,51	6°

Fonte: elaborado pela Autora.

Conforme se pode observar, as modelagens M z = 10m e M z = D, com resolução espacial de 1m, foram as que apresentaram as maiores taxas de acertos, de 43 e 40%, respectivamente. Entretanto, também foram as que apresentaram os maiores valores de erros, o

que indica que parte da área classificada como instável pelo SHALSTAB não apresentou ocorrência de deslizamentos.

As modelagens C z = 5m e D z = 10m, com resolução espacial de 1m, por possuírem menos áreas classificadas como instáveis, apresentaram as menores taxas de acertos, com 23 e 36%, respectivamente. Mas, as taxas de áreas classificadas erroneamente como instáveis, IE, também foram as mais baixas, de 8 e 14%, respectivamente.

Contudo, de acordo com Sorbino, Sica e Cascini (2010), o modelo que melhor descreve o fenômeno é aquele que obtém a maior relação IA/IE. Por meio dessa análise é avaliada não apenas a taxa de acerto do modelo em representar deslizamentos nos locais onde de fato ocorreram, mas também sua capacidade de não superestimar as áreas instáveis nos locais de ausência de deslizamentos. Destaca-se que o incremento das áreas instáveis em relação à ocorrência deslizamentos pode não condizer com a realidade da área de estudo.

Nesse contexto, os cenários que obtiveram os maiores valores de IA/IE foram: C z=5m (2,95), D z=10m (2,65) e C z=10m (2,62), com *pixel* de 1m, apresentados na Figura 112 com a sobreposição das superfícies de ruptura estimadas. Na Tabela 28, são apresentados os valores de Verdadeiros Positivos (VP), Falsos Positivos (FP), Falsos Negativos (FN) e Verdadeiros Negativos (VN) e as estatísticas de precisão derivadas da Matriz de Confusão dessas modelagens.

Tabela 28 - Matriz de Confusão e estatísticas de precisão das modelagens com os maiores valores de IA/IE.

	C z=5m (1m)	D z=10m (1m)	C z=10m (1m)
VP [n. <i>pixels</i>]	316162	433571	441979
FP [n. <i>pixels</i>]	8569722	16922530	17456383
FN [n. <i>pixels</i>]	466929	349304	340751
VN [n. <i>pixels</i>]	50488216	44480802	43930073
Eficiência	0,85	0,72	0,71
TCI	0,15	0,28	0,29
Sensibilidade	0,40	0,55	0,56
Especificidade	0,85	0,72	0,72
TFP	0,15	0,28	0,28
TFN	0,60	0,45	0,44

Fonte: elaborado pela Autora.

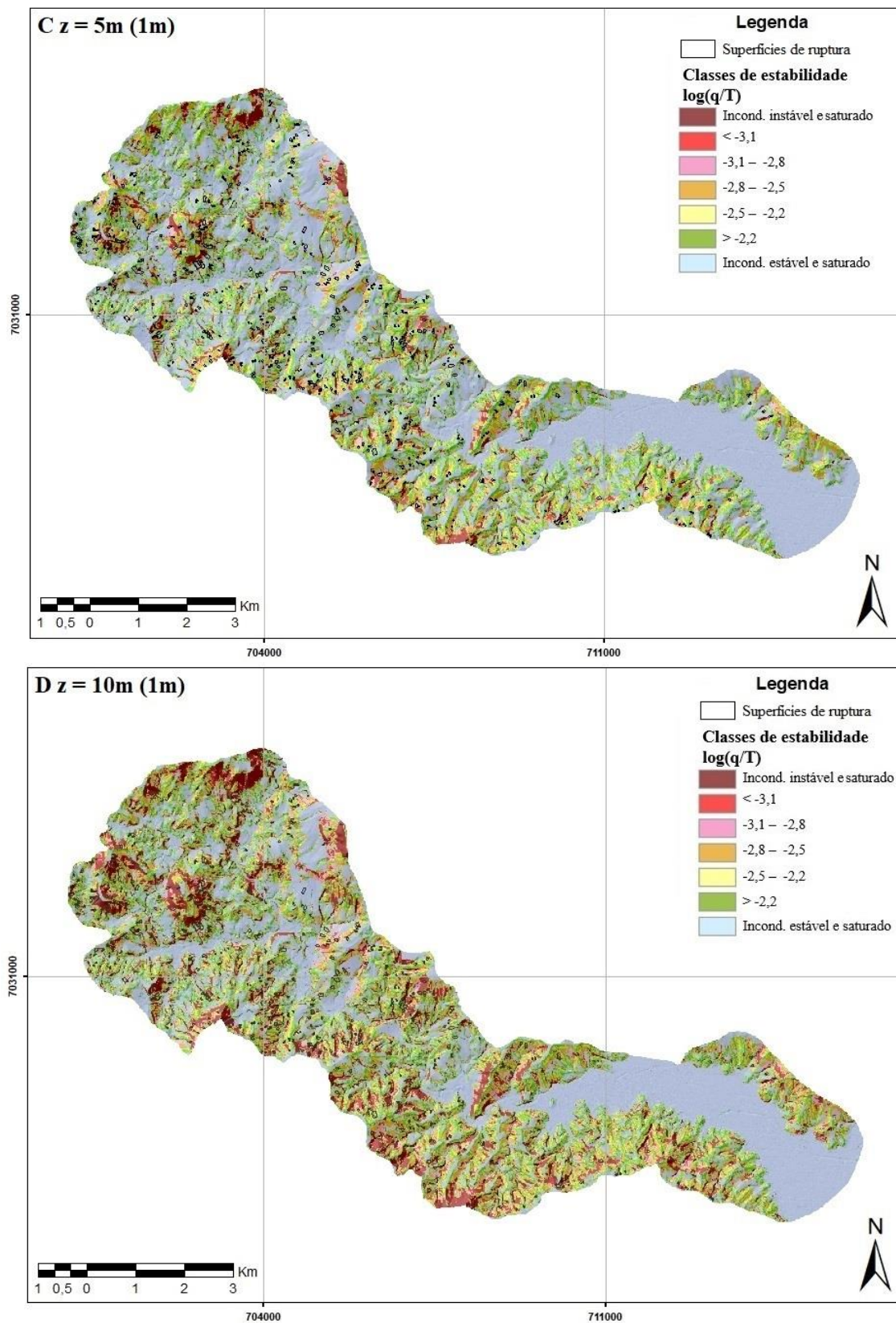
Dentre os cenários, o C z=5m (1m) apresentou a maior porcentagem de Verdadeiros Negativos (VN), de 84,4%, dessa forma, foi o cenário que melhor classificou corretamente as áreas estáveis sem a ocorrência de deslizamentos. Em contrapartida, apresentou 0,5% de Verdadeiros Positivos (VP), e os cenários D z=10m (1m) e C z=10m (1m) apresentaram 0,7%,

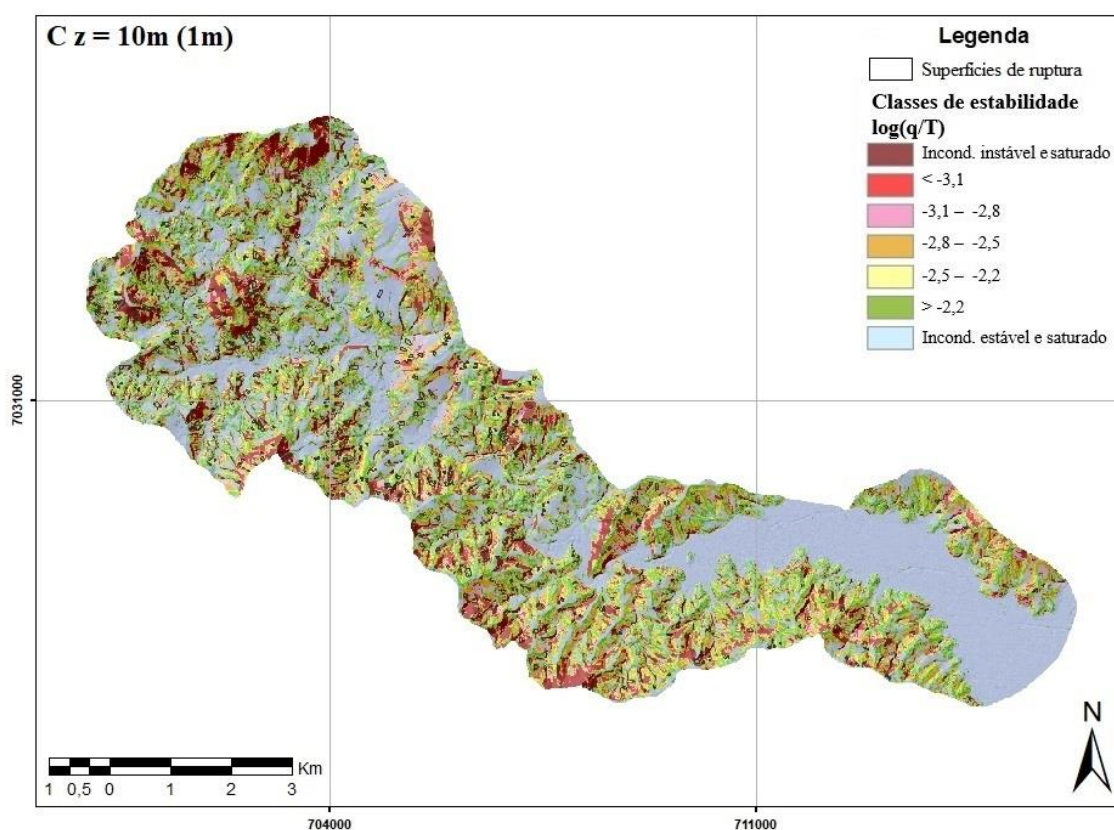
ou seja, áreas com ocorrência de cicatrizes classificadas como instáveis pelo modelo matemático.

O cenário C $z=5m$ (1m) apresentou, ainda, a menor porcentagem (14,3%) de células (*pixels*) classificadas como Falso Positivo (FP), ou seja, áreas classificadas como instáveis sem superfícies de ruptura de deslizamentos. Em relação às células classificadas como Falso Negativo (FN), o cenário apresentou um valor ligeiramente acima dos outros cenários, de 0,8%, em relação a 0,6% (D $z=10m - 1m$) e 0,5% (C $z=10m - 1m$), essas são áreas com ocorrência de cicatrizes classificadas como estáveis. Segundo Guzzetti (2005), baixas taxas desse índice, da ordem 15% ou inferior, constituem indicativos da boa qualidade da modelagem. Ainda, uma pequena proporção de casos positivos em relação aos negativos, que geralmente ocorre em análises de suscetibilidade, origina valores de VP e FN consideravelmente mais baixos em relação aos valores de FP e VN (BEGUERÍA, 2006), como foi observado nesta pesquisa.

A partir dos valores da Matriz de Confusão, foi possível calcular algumas estatísticas de precisão. Observou-se que o cenário C $z=5m$ (1m) apresentou os melhores resultados para Eficiência, Taxa de Classificação Incorreta (TCI), Especificidade e Taxa de Falsos Positivos (TFP). O cenário C $z=10m$ (1m) apresentou os melhores resultados para Sensibilidade e Taxa de Falsos Negativos (TFN). Eficiência ou Acurácia é a proporção de acertos do modelo e a Taxa de Classificação Incorreta (TCI) é a proporção de erros. A Sensibilidade ou *Recall* expressa a proporção de casos positivos (cicatrizes) corretamente preditas e a Especificidade, por outro lado, está relacionada à proporção de casos negativos corretamente preditos (BEGUERÍA, 2006).

Figura 112 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú com maiores valores de IA/IE.





Fonte: elaborado pela Autora.

Destaca-se que as modelagens que melhor se ajustaram à situação real (do desastre natural de novembro de 2008) da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foram aquelas obtidas sem a espacialização dos parâmetros geotécnicos, ou seja, nas quais foi utilizado um único valor de c , ϕ e γ_{sat} para toda a área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú calculado por meio da média ponderada, utilizando a área das unidades geotécnicas em C e dos modelados de relevo em D, na escala 1:10.000, revelando a dificuldade de se encontrar um meio de regionalização, de forma eficiente e em escala de bacia hidrográfica, dos parâmetros referentes aos solos em análises de estabilidade.

Seefelder *et al.* (2016) enfatizam que, em modelos físicos, os parâmetros de resistência ao cisalhamento não sejam interpretados em termos absolutos devido à incerteza inerente a eles, relacionada principalmente a dificuldade de capturar por meio de ensaios de campo e de laboratório a sua distribuição espacial. Contudo, mesmo que para a modelagem seja utilizado um único valor geotécnico como dado de entrada, para toda a área em estudo, verificou-se como importante a determinação dos parâmetros dos solos de forma regionalizada a fim de capturar a diferenciação das características geotécnicas mais expressivas entre as áreas.

Em relação à hipótese levantada nesta pesquisa, para a escala em análise, de que o uso do mapeamento geotécnico para definir os locais de coleta de dados e para espacializar esses valores seria o cenário de maior capacidade preditiva nas modelagens geradas com o SHALSTAB, acredita-se ser satisfatória a obtenção do dado geotécnico de forma pontual (ensaio), mas espacializada por unidades geotécnicas de interesse, evitando-se a obtenção de forma aleatória. Ainda, se possível, sugere-se a utilização conjunta dos modelados de relevo. Nesse caso, com o uso do equipamento BST associado ao mapeamento geotécnico, por se tratar de um ensaio de campo de fácil e rápida execução, é possível abranger uma área maior em menor tempo quando não há restrições física ou legal de acesso a alguma área, como, por exemplo, locais carentes de estradas, de topografia muito acidentada, com vegetação densa e propriedades privadas e, ainda, obter resultados com baixa variabilidade e semelhantes aos obtidos pelos ensaios de laboratório.

Além disso, o uso dos polígonos das unidades geotécnicas foi necessário na identificação de um valor médio ponderado para ser utilizado em toda a bacia hidrográfica, destacando a importância do mapeamento geotécnico na orientação da magnitude dos parâmetros de entrada que possam retratar, mesmo que de maneira generalizada, as características do subsolo. Ainda, acredita-se que a melhora da escala do mapeamento geotécnico que resulte, ao menos, na compatibilização com a escala do MDE (1:10.000), possibilitaria a elaboração de cenários ainda mais próximos à realidade na área de estudo.

O resultado observado nesta pesquisa vai ao encontro do obtido por Sbroglia *et al.* (2018b) e Flach (2020) para a mesma área de estudo e utilizando o mesmo modelo matemático, SHALSTAB. Os autores observaram que o cenário que utilizou um único valor de cada parâmetro geotécnico para toda a área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foi o que apresentou maior capacidade preditiva dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008, sendo que para Sbroglia *et al.* (2018b) o cenário de maior capacidade preditiva foi por meio da média ponderada por unidade geotécnica e para Flach (2020) foi por meio da média simples dos valores obtidos do BST e dos menores valores dos parâmetros obtidos pelo Cisalhamento Direto.

Complementarmente, foram elaboradas outras duas modelagens com base no cenário de maior capacidade preditiva ($C z=5m$ - *pixel* de 1m), que foi elaborado com os parâmetros do banco de dados georreferenciado (BD) da área de estudo. Nessas duas novas modelagens foi calculada separadamente a média ponderada, por polígono da unidade geotécnica, dos valores

dos parâmetros obtidos pelo ensaio de Cisalhamento Direto (CD) e pelo *Borehole Shear Test* (BST), conforme apresentada na Tabela 29.

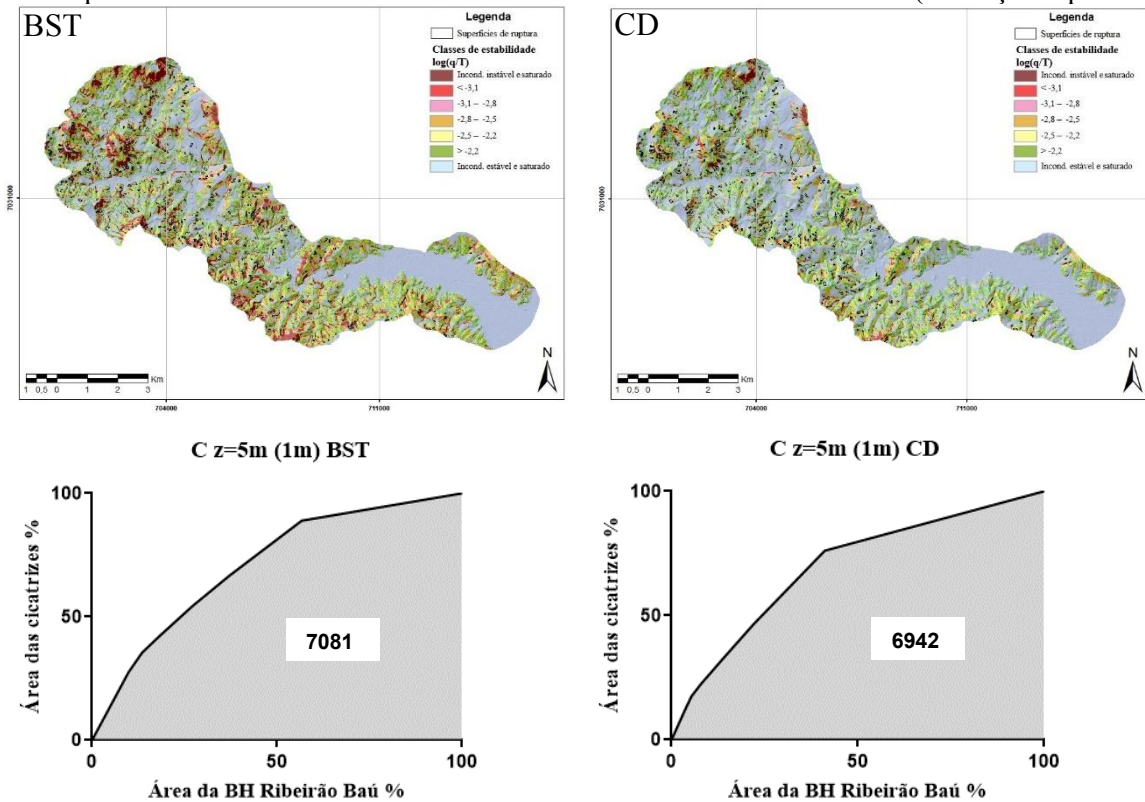
Tabela 29 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizados nos cenários.

	Intercepto coesivo [kPa]	Ângulo de atrito [grau]	γ_{sat} [kN/m ³]
Cenário C (BD)	9,24	27,21	18,76
Cenário C (dados BST)	6,52	26,23	18,76
Cenário C (dados CD)	12,97	27,77	18,76

Fonte: elaborado pela Autora.

A Figura 113 apresenta os resultados das modelagens, com as superfícies de ruptura sobrepostas, e na Tabela 30 são apresentados os valores de área acumulada de cada classe de estabilidade do SHALSTAB por área acumulada das superfícies de ruptura dos deslizamentos e o valor de AAC para as respectivas curvas de predição (Figura 113).

Figura 113 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamentos com a média ponderada dos dados obtidos pelo ensaio de *Borehole Shear Test* -BST e Cisalhamento Direto - CD (resolução espacial 1m).



Fonte: elaborado pela Autora.

Tabela 30 - Resultados das modelagens com a média ponderada dos dados obtidos pelo ensaio de *Borehole Shear Test* - BST e Cisalhamento Direto - CD (resolução espacial 1m).

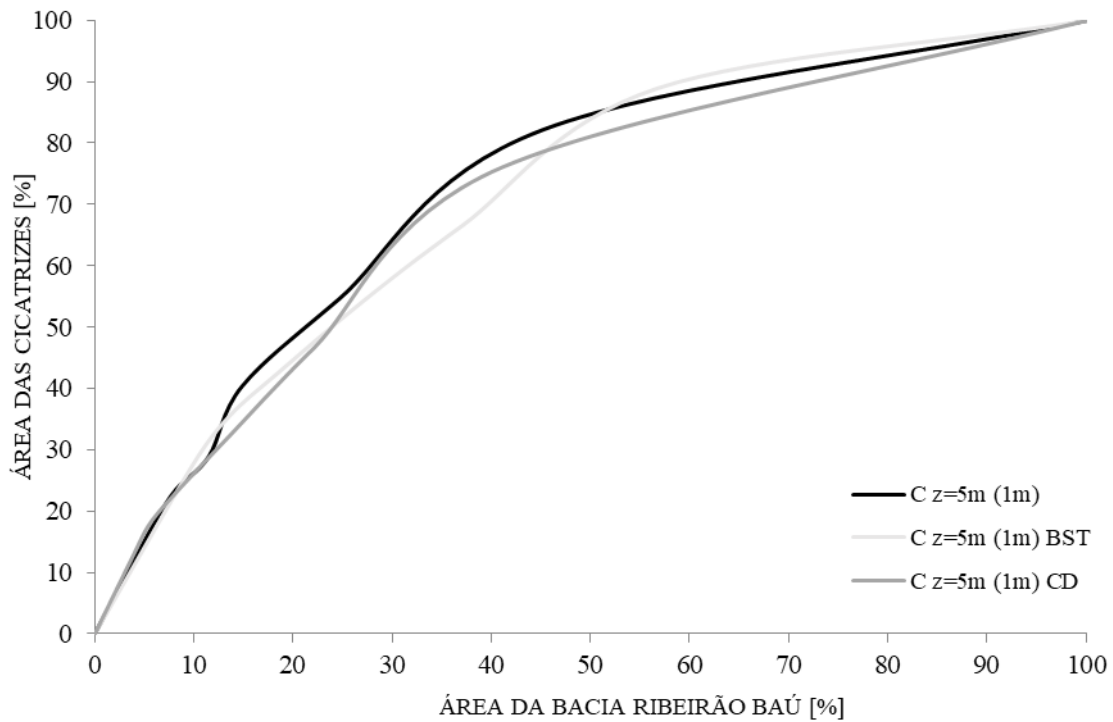
Classe de estabilidade SHALSTAB	C z=5m (1m) BST			C z=5m (1m) CD		
	Área Ac. [%]	Cic. Ac. [%]	AAC	Área Ac. [%]	Cic. Ac. [%]	AAC
<i>Incond. Instável</i>	9,9	27,5		3,7	12,3	
< -3,1	13,5	35,4		5,4	17,6	
-3,1 - -2,8	18,4	42,4		7,7	22,2	
-2,8 - -2,5	27,0	54,2	0,708	13,6	32,3	0,694
-2,5 - -2,2	37,1	66,6		22,1	46,6	
> -2,2	56,7	89,0		41,2	76,1	
<i>Incond. Estável</i>	100,0	100,0		100,0	100,0	

Fonte: elaborado pela Autora.

Observou-se que a modelagem a partir dos dados obtidos pelo *Borehole Shear Test* (BST) apresentou 6% a mais de área classificada como incondicionalmente instável em relação à modelagem a partir dos dados obtidos pelo ensaio de Cisalhamento Direto (CD), e, ainda, apresentou 15% a mais de superfícies de ruptura localizadas nessa classe. Isso pode ser explicado pelos menores valores de coesão e ângulo de atrito adquiridos no ensaio de campo, os quais ocasionaram a elaboração de cenários mais favoráveis à segurança (conservadores). Assim como Flach (2020), que observou em todas as modelagens de suscetibilidade que os valores do BST apresentaram maiores porcentagens de classes mais instáveis quando comparadas às do Cisalhamento Direto. Ainda, a modelagem com os dados CD possui 15% a mais de área classificada como incondicionalmente estável, e 12,9% de cicatrizes localizadas nessa classe em relação à modelagem com os dados BST.

Por fim, a Figura 114 apresenta as curvas de predição para essas modelagens, em comparação ao cenário C, que utilizou o Banco de Dados (BD) - valores de BST e CD. A partir das curvas e dos valores de Área Abaixo da Curva obtidos, observou-se que a modelagem de maior capacidade preditiva é a que utilizou os dados obtidos pelos dois ensaios (AAC 0,717), seguida da modelagem que utilizou apenas os parâmetros do BST (AAC 0,708) e o de menor capacidade preditiva foi com os parâmetros do CD (AAC 0,694).

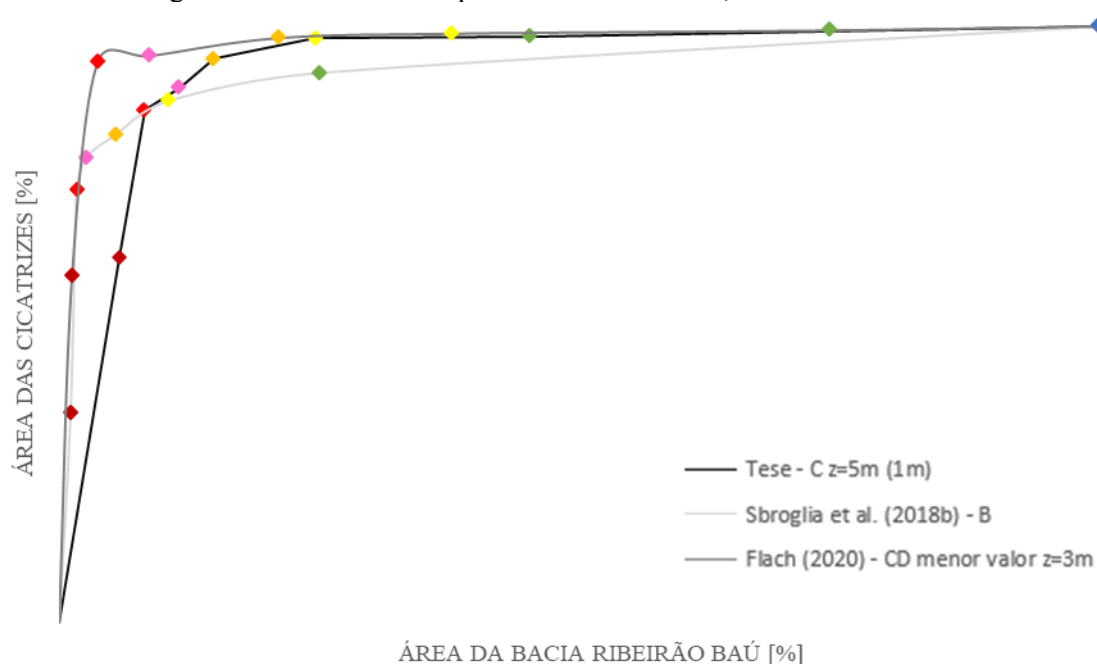
Figura 114 - Curvas de predição das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: elaborado pela Autora.

A fim de comparar o mapa de suscetibilidade com outros trabalhos realizados na mesma área de estudo e utilizando o SHALSTAB, foi realizada a validação do cenário C z=5m (1m), elaborado com os parâmetros do Banco de Dados, a partir do método empregado por Sbroglia *et al.* (2018b) e Flach (2020). Dessa forma, identificou-se em cada polígono de superfície de ruptura nas cicatrizes dos deslizamentos o valor mínimo de instabilidade, ou seja, o *pixel* classificado como mais instável dentre as classes do SHALSTAB. A Figura 115 apresenta as curvas de predição elaboradas por meio desse método para os cenários de maior capacidade preditiva de cada pesquisa.

Figura 115 - Curvas de predição das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para diferentes autores, utilizando o SHALSTAB.



Fonte: elaborado pela Autora.

Em relação ao aspecto visual das curvas de predição, o cenário de maior capacidade preditiva de Flach (2020) (com os menores valores obtidos do ensaio de Cisalhamento Direto, $z=3\text{m}$, *pixel* 1m) apresentou a curva mais íngreme para a esquerda, ou seja, um elevado percentual de cicatrizes em uma pequena área da bacia, apresentando boa capacidade preditiva dos deslizamentos. Ainda, as curvas dos cenários C $z=5\text{m}$ (*pixel* 1m) e de Flach (2020) alcançaram a proporção de quase 100% dos *pixels* deslizados em menor área do que o cenário de maior capacidade preditiva, B (média ponderada por meio dos polígonos das unidades geotécnicas, $z=2\text{m}$, *pixel* 1m), de Sbroglia *et al.* (2018b).

Contudo, importante mencionar que nas modelagens com o SHALSTAB de Flach (2020), diferentemente dos outros autores, foram desconsideradas as áreas e superfícies de rupturas localizadas nas unidades geotécnicas Cc (Cambissolo substrato de conglomerado), Cde (Cambissolo substrato depósito de encostas) e GHsq (Gleissolo substrato sedimentos quaternários aluviais). Dessa forma, pode-se realizar uma comparação mais precisa entre o cenário C $z=5\text{m}$ (1m) e o de Sbroglia *et al.* (2018b).

Conforme se pode observar na Tabela 31, nesta pesquisa 85,9% das superfícies de ruptura ocorreram na área instável (equivalente às classes incondicionalmente instável a

$\text{Log}(q/T) < -3,1$ do SHALSTAB) pelo método empregado, correspondendo a 8,1% da área bacia hidrográfica. Para Sbroglia *et al.* (2018b), o cenário com melhor capacidade preditiva apresentou 72,5% das superfícies de ruptura em 1,7% de área nessas duas classes mais instáveis do modelo.

Ainda, nesta pesquisa, 1,7% de cicatrizes ocorreram na classe incondicionalmente estável do modelo, a qual abrangeu 54,7% da área da bacia hidrográfica, e para Sbroglia *et al.* (2018b) 7,8% de cicatrizes ocorreram em 75,0% da classe incondicionalmente estável. Importante destacar que, conforme observado nas modelagens de suscetibilidade, o SHALSTAB possui melhor desempenho na classificação das áreas instáveis em detrimento das classes estáveis, uma vez que apenas 1 classe (incondicionalmente estável) abrange uma grande área da bacia hidrográfica, dessa forma, há uma superestimação das áreas classificadas como seguras.

Destaca-se que esses dois cenários foram elaborados a partir da média ponderada calculada utilizando as unidades geotécnicas, para profundidades de ruptura (z) distintas, de 5 e 2 metros, e a partir do modelo digital de elevação com resolução espacial de 1 metro. Para os dados geotécnicos, os valores utilizados nas modelagens dos cenários C $z=5\text{m}$ (1m) e B (SBROGLIA *et al.*, 2018b) foram, respectivamente, intercepto coesivo 9,24 e 6,62kPa, ângulo de atrito 27,2 e 28,0° e peso específico saturado 18,8 e 18,1 kN/m³.

Em relação ao cálculo da Área Abaixo da Curva (AAC), o cenário C $z=5\text{m}$ (1m) apresentou o maior valor, de 0,935, ou seja, possui maior capacidade preditiva (Tabela 31). Contudo, ambos cenários são classificados como Excelente conforme as classes definidas por Swets (1988), Guzzetti (2005) e Thuiller *et al.* (2010) e apresentadas no Quadro 9.

Tabela 31 - Resultados das modelagens obtidos para o cenário C $z=5\text{m}$ (1m) e para o cenário B em Sbroglia *et al.* (2018b).

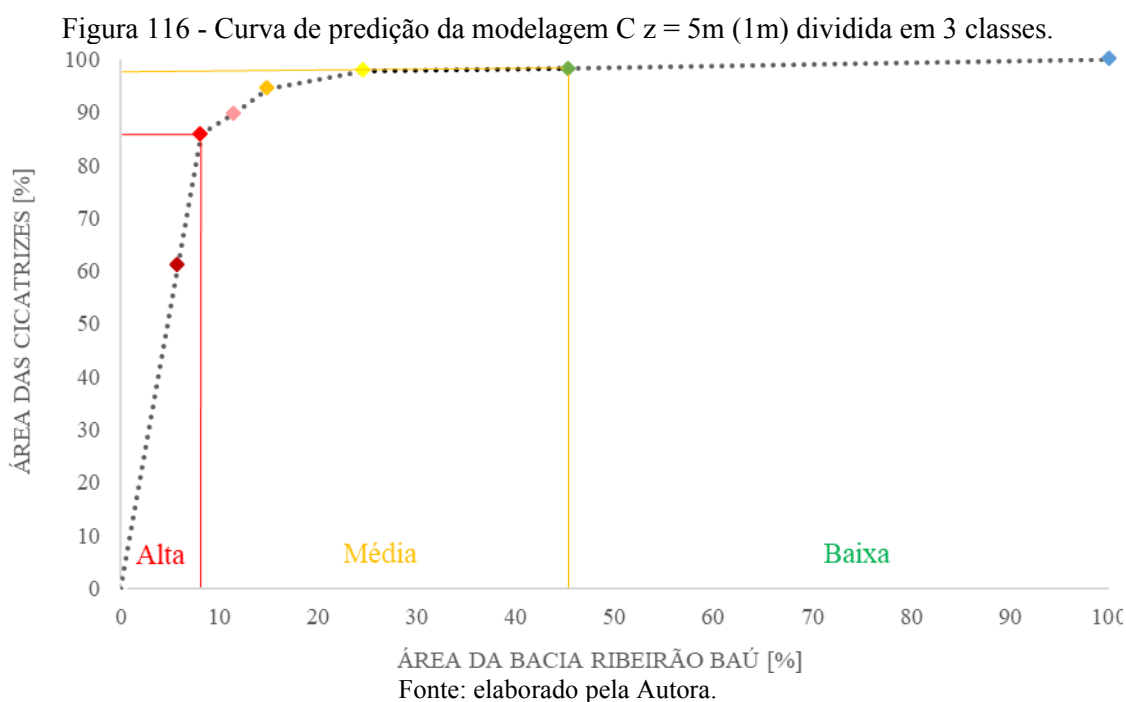
Classe de estabilidade SHALSTAB	Tese - C $z=5\text{m}$ (1m)			Sbroglia <i>et al.</i> (2018b) - B		
	Área Ac. [%]	Cic. Ac. [%]	AAC	Área Ac. [%]	Cic. Ac. [%]	AAC
<i>Incond. Instável</i>	5,8	61,2		1,1	35,1	
< -3,1	8,1	85,9		1,7	72,5	
-3,1 - -2,8	11,5	89,7		2,6	78,0	
-2,8 - -2,5	14,8	94,5	0,935	5,4	81,8	0,929
-2,5 - -2,2	24,6	97,9		10,5	87,5	
> -2,2	45,3	98,3		25,0	92,2	
<i>Incond. Estável</i>	100,0	100,0		100,0	100,0	

Fonte: elaborado pela Autora.

5.5.6 Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú

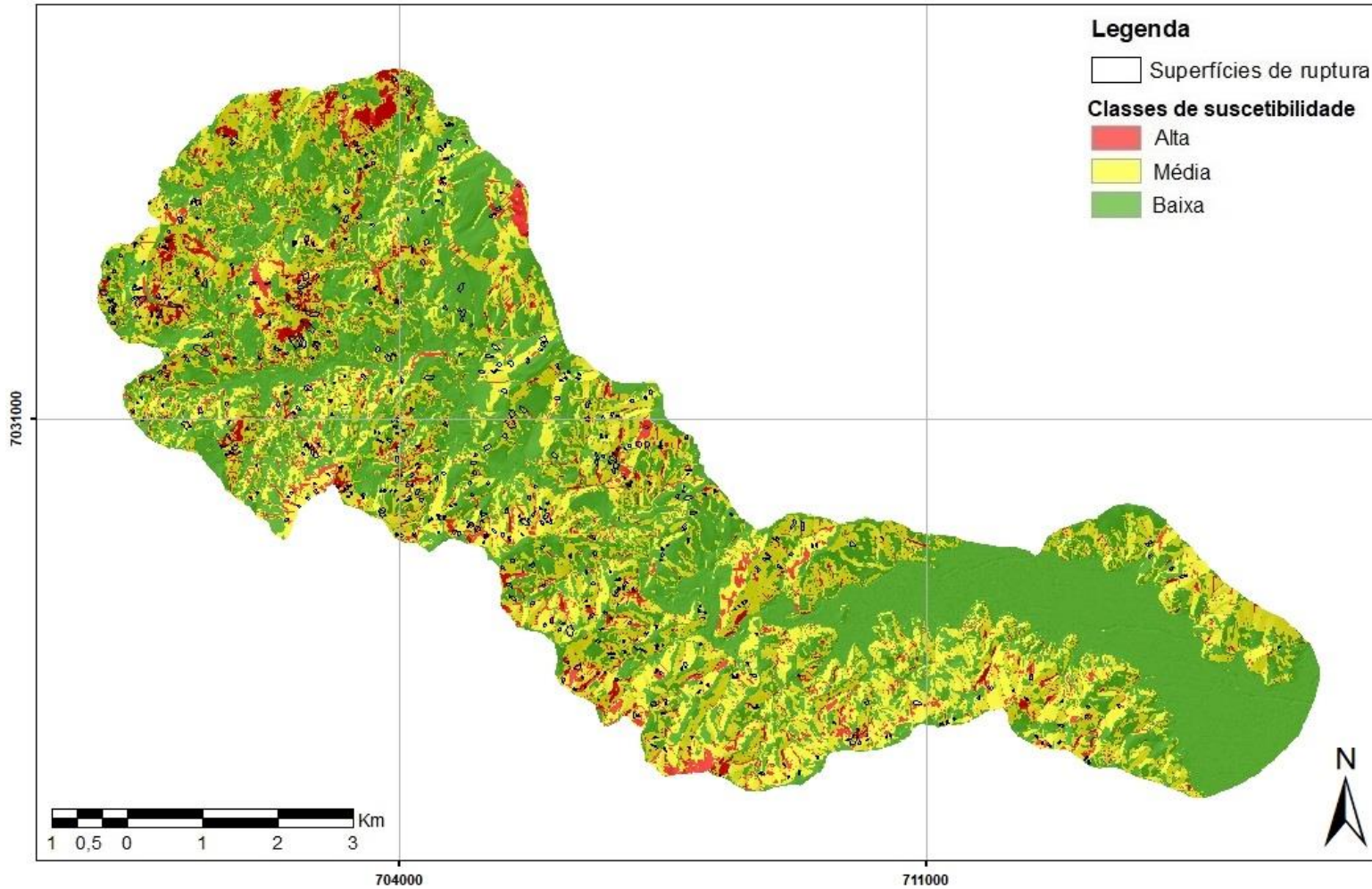
O cenário que mais bem representou o desastre natural ocorrido em novembro de 2008 foi reclassificado utilizando o sistema semafórico de representação, com o intuito de simplificar a sua interpretação e contribuir para a divulgação de forma padronizada, em consonância com o Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa (CPRM, 2018) e as Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização Frente aos Desastres Naturais.

Dessa forma, a modelagem $C z = 5m$ (resolução espacial de 1m), a partir dos parâmetros do Banco de Dados, foi dividida em 3 classes de estabilidade, baixa, média e alta suscetibilidade, representadas pelas cores verde, amarelo e vermelho, respectivamente, conforme se pode observar na Figura 116.



Na Figura 117 é apresentado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais semafórico da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, no qual as classes de suscetibilidade a deslizamentos são representadas com as cores verde, amarelo e vermelho, e sobrepostas as cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em 2008. Ainda, na Tabela 32 é apresentada a análise dos parâmetros morfológicos (altitude, declividade, orientação e forma das encostas) em cada uma das três classes de suscetibilidade.

Figura 117 - Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais semafórico da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú.



Fonte: elaborado pela Autora.

Tabela 32 - Análise dos parâmetros morfológicos nas classes de suscetibilidade a deslizamentos.

Classes	BAIXA (VERDE)		MÉDIA (AMARELO)		ALTA (VERMELHO)	
	Área [%]	Área Ac. [%]	Área [%]	Área Ac. [%]	Área [%]	Área Ac. [%]
Altitude (metros)						
<i>0-50</i>	30,5	30,5	6,7	6,7	3,9	3,9
<i>50-100</i>	9,6	40,1	13,2	19,9	8,8	12,7
<i>100-150</i>	10,8	50,8	14,5	34,4	11,0	23,8
<i>150-200</i>	10,1	60,9	14,0	48,4	12,3	36,1
<i>200-250</i>	8,7	69,7	12,7	61,1	13,0	49,0
<i>250-300</i>	7,8	77,5	10,8	71,9	11,6	60,6
<i>300-350</i>	7,4	84,9	7,7	79,6	9,0	69,6
<i>350-400</i>	5,3	90,2	6,1	85,7	6,4	76,0
<i>400-450</i>	4,0	94,2	5,0	90,6	5,9	81,9
<i>450-500</i>	3,1	97,2	3,6	94,2	6,0	87,9
<i>500-550</i>	1,4	98,6	2,3	96,5	4,3	92,2
<i>550-600</i>	0,5	99,1	1,5	98,0	3,3	95,5
<i>600-650</i>	0,6	99,7	1,2	99,2	2,0	97,6
<i>650-700</i>	0,3	100,0	0,6	99,8	1,4	99,0
<i>700-750</i>	0,0	100,0	0,2	100,0	0,9	99,9
<i>750-800</i>	0,0	100,0	0,0	100,0	0,1	100,0
<i>800-850</i>	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
Declividade (graus)						
<i>0-5</i>	24,5	24,5	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>5-10</i>	18,0	42,5	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>10-15</i>	25,7	68,2	0,0	0,0	0,1	0,1
<i>15-20</i>	31,8	100,0	5,9	5,9	0,6	0,7
<i>20-25</i>	0,0	100,0	49,9	55,8	4,7	5,4
<i>25-30</i>	0,0	100,0	34,6	90,5	5,7	11,1
<i>30-35</i>	0,0	100,0	9,5	100,0	38,8	49,9
<i>35-40</i>	0,0	100,0	0,0	100,0	34,0	83,9
<i>40-45</i>	0,0	100,0	0,0	100,0	10,9	94,9
<i>>45</i>	0,0	100,0	0,0	100,0	5,1	100,0
Orientação da encosta						
<i>Norte</i>	10,8	10,8	11,0	11,0	13,1	13,1
<i>Nordeste</i>	11,0	21,8	11,8	22,8	12,1	25,2
<i>Leste</i>	13,5	35,3	13,7	36,5	15,5	40,8
<i>Sudeste</i>	14,6	49,9	15,6	52,1	15,8	56,5
<i>Sul</i>	15,7	65,6	12,0	64,1	11,0	67,5
<i>Sudoeste</i>	13,1	78,7	10,3	74,5	8,5	76,0
<i>Oeste</i>	10,8	89,5	12,2	86,7	12,7	88,7
<i>Noroeste</i>	10,5	100,0	13,3	100,0	11,3	100,0
Forma da encosta						
<i>Côncava</i>	42,0	42,0	40,6	40,6	47,2	47,2
<i>Retilínea</i>	9,8	51,8	11,1	51,7	7,1	54,2
<i>Convexa</i>	48,2	100,0	48,3	100,0	45,8	100,0

Fonte: elaborado pela Autora.

Conforme se pode observar na Figura 117 e Tabela 32, a classe de alta suscetibilidade (vermelho) abrange uma área de 8% da bacia hidrográfica e é aquela que apresenta a maior influência sobre a ocorrência de deslizamentos, ou seja, onde estão localizados 86% das superfícies de ruptura. Essa classe apresenta-se em maior parte nas unidades geotécnicas de Cambissolo substrato de gnaiss (Cgn), 41%, arenito (Ca), 30%, e folhelho (Cf), 24%, em relevo montanhoso, 55%, colinoso, 43%, e escarpado. Em relação aos parâmetros morfológicos, as áreas com maior suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos possuem declividade variando de 30 a 45° (84%), sendo que praticamente não ocorrem em áreas de baixa declividade, abaixo de 15°. Apenas 4% dessa classe ocorre em altitude menor que 50m, sendo a maior parte, 57%, localizada nas altitudes entre 100 e 350m e há, ainda, áreas localizadas nas altitudes mais elevadas da bacia. A maior porcentagem de alta suscetibilidade é nas encostas côncavas (47%); e naquelas com orientação para Sudeste (16%) e Leste (16%), a menor porcentagem ocorre nas encostas voltadas para Sudoeste (9%).

Uma área de 37% foi classificada de média suscetibilidade (amarelo), representando 12% das superfícies de ruptura dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008. Destacam-se as unidades geotécnicas de Cambissolo com substrato de gnaiss (Cgn), arenito (Ca), folhelho (Cf), conglomerado (Cc) e piroxenito (Cpi) em relevo colinoso, 56%, e montanhoso, 43%. A maior parte dessa classe localiza-se entre as declividades de 20 e 30° (84%), sendo que 50% da classe possui inclinação de 20 a 25°. Ainda, as encostas com declividades abaixo de 15° e acima de 35° não possuem média suscetibilidade. Em relação à altitude, 65% da área dessa classe possui de 50 a 300m. Há uma diferença de 7% entre a porcentagem de encostas convexas (48%) e côncavas (41%). Para a orientação das encostas, ocorre boa distribuição entre as classes, destacando-se aquelas voltadas a Sudeste (16%).

Por fim, a classe de baixa suscetibilidade (verde), ou seja, onde estão localizadas apenas 2% das superfícies de ruptura mapeadas, abrange 55% da área de estudo. Na unidade Gleissolo sedimentos quaternários aluvionares (GHsq) localiza-se em 98%, e nas áreas planas presentes nas outras unidades geotécnicas. Toda a área da classe (100%) possui relevo com declividade de até 20°. Dessa forma, encostas com declividade a partir de 20° não foram classificadas como de baixa suscetibilidade. Ainda, 61% da área localiza-se em altitude de até 200m, sendo 30% até 50m. Em relação à forma das encostas, apresentou maior proporção nas convexas (48%), que se caracterizam por serem áreas divergentes de fluxo de água.

Na aplicabilidade do mapa de suscetibilidade a deslizamentos produzido nesta pesquisa, com vistas ao ordenamento territorial, as diferentes classes devem traduzir, da classe de alta suscetibilidade para a classe de baixa, uma progressiva diminuição da probabilidade de ocorrer um deslizamento. Dessa forma, é esperado que num futuro, ainda indeterminado, pelo método adotado as áreas classificadas como de alta suscetibilidade, média e baixa, apresentem, respectivamente, 86%, 12% e 2% dos deslizamentos que porventura venham a ocorrer na área de estudo (ZÊZERE, 2006; BARELLA, 2016).

Ainda, nos locais classificados como de alta suscetibilidade que não há cicatriz de deslizamentos não significa, necessariamente, um erro de classificação. Poderá indicar que não existiu ocorrência de deslizamento no período em análise, o que não invalida que possa ocorrer no futuro, representando, por isso, áreas que o evento ainda não foi deflagrado, mas que são propensas a sua ocorrência; isso se deve às características semelhantes entre essas áreas (BEGUERÍA, 2006; GARCIA; ZÊZERE; OLIVEIRA, 2007). Importante destacar que Guzzetti (1999) considera que os futuros deslizamentos só ocorrem sob as mesmas condições que os originaram no passado se os fatores de predisposição forem temporalmente invariáveis, para o período de vigência do modelo. Isso quer dizer que, cada vez que ocorre um evento de instabilidade, as condições ambientais que os deflagaram (topografia, condições geotécnicas, litológicas ou hidrológicas) podem alterar-se, por vezes substancialmente, podendo, no futuro, não potencializar novas manifestações de instabilidade.

Por fim, a proporção de áreas classificadas como de baixa suscetibilidade, mas que ocorreram deslizamentos é mais preocupante, pois são áreas que na realidade são instáveis e foram classificadas erroneamente pelo modelo. Importante destacar que essas áreas apresentam ainda alguma possibilidade, mesmo que mínima, de ocorrência de deslizamentos, em um futuro indeterminado.

6 CONCLUSÕES

Nesse capítulo são apresentadas as considerações finais e conclusões em relação aos seguintes temas: influência da resolução espacial do Modelo Digital de Elevação (MDE) nos parâmetros morfológicos e modelagens de suscetibilidade a deslizamentos; análise da aplicabilidade do equipamento *Borehole Shear Test* (BST); distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e sua influência nas modelagens; validação das modelagens de suscetibilidade; e mapa semafórico de áreas suscetíveis a deslizamentos.

A partir da análise da influência da escala dos produtos cartográficos utilizados na elaboração dos mapas morfológicos, observou-se maior detalhamento e discretização das nuances do relevo nos mapas com resolução espacial de 1m (escala 1:10.000) em detrimento daqueles com resolução espacial de 10m (escala 1:50.000). Foi possível observar variação mais evidente nos mapas de declividade, área de contribuição e de forma das encostas. Destaca-se que o MDE de maior escala (*pixel* de 1m) foi elaborado posteriormente ao desastre natural, nesse sentido, observou-se alterações significativas no formato das curvas de nível no interior das cicatrizes e na forma das encostas. Anteriormente, a forma predominante de relevo nas superfícies de ruptura era convexa, demonstrando que os deslizamentos escavaram o terreno.

No que diz respeito à influência da escala no comportamento do modelo SHALSTAB, foi observado um incremento de qualidade com o nível de detalhamento da base topográfica. Ocorreu um aumento significativo das áreas de maior estabilidade nas modelagens de menor resolução espacial (*pixel* de 10m), demonstrando a suavização na representação do relevo e alteração da convergência topográfica, os quais subestimaram o grau de suscetibilidade. Dessa forma, observou-se uma elevada área de superfícies de ruptura nas classes estáveis nessas modelagens e uma baixa capacidade preditiva. Em média, a diferença entre as áreas deslizadas localizadas na classe incondicionalmente estável, entre as duas resoluções, foi de cerca de 30%.

Como os dados topográficos de entrada do modelo derivam do MDE, sua resolução e qualidade são cruciais para obtenção de cenários com maior capacidade preditiva. Dessa forma, conclui-se que, embora o MDE com *pixel* de 10m (escala 1:50.000) seja anterior à ocorrência dos movimentos de massa, seu uso para análise de suscetibilidade a deslizamentos com o SHALSTAB, em detrimento do MDE com escala maior (1:10.000) elaborado após 2008, não é indicado por reduzir a eficiência do modelo. Nesse sentido, recomenda-se que as modelagens

com escala 1:50.000 sejam empregadas em análises preliminares, visto a necessidade de uma escala mais detalhada para a determinação das áreas críticas a deflagração de deslizamentos.

O principal aspecto de ineditismo dessa pesquisa foi a comparação das envoltórias de ruptura dos ensaios *Borehole Shear Test*, Cisalhamento Direto e Compressão Triaxial executados em laboratório sob as mesmas condições (características geotécnicas do corpo de prova, valores de tensão normal e drenagem). Uma vez que não foi observada pesquisa, no contexto mundial, que tenha realizado essa comparação de forma controlada, apenas a partir da coleta de amostras indeformadas para o ensaio em laboratório, nas quais podem ocorrer perturbação e alterações dos parâmetros dos solos, e execução do BST em campo, que pode ocorrer variabilidade devido a heterogeneidade dos solos.

As envoltórias de ruptura apresentaram coeficiente de determinação (r^2) próximo à unidade, correlações consideradas satisfatórias e, como resultado, obtiveram-se valores de parâmetros de resistência semelhantes. A variação mais significativa ocorreu entre os resultados do ensaio de Cisalhamento Direto e BST para o ângulo de atrito, de 6° , entre os ensaios BST e de Compressão Triaxial para intercepto coesivo, de 1,9kPa. Ainda, quando calculado o Fator de Segurança (FS) para um talude genérico com os dados obtidos dos ensaios, observou-se que os resultados gerados a partir do BST foram mais a favor da segurança, uma vez que apresentou os menores valores de FS. Para o talude saturado a variação do FS entre os dados do BST e de Compressão Triaxial foi menor que 10% e do BST e do Cisalhamento Direto foi de 12%.

Dentre as principais características do BST, a maior vantagem em comparação aos ensaios de laboratório é a portabilidade do equipamento e o fato de não necessitar de fontes de energia externas ou acessórios de perfuração especializados. Além disso, não requer experiência do operador, sendo de simples compreensão. Os ensaios BST são menos onerosos do que o Cisalhamento Direto e, sobretudo, de Compressão Triaxial. Os dados não possuem elevada variabilidade e, devido a interferência nas paredes do furo possivelmente ser menor do que a perturbação que a amostra de solo sofre durante a coleta, transporte e manuseio do corpo de prova em laboratório, seus resultados são bastante confiáveis. É importante salientar que, para a qualidade dos dados obtidos, não deve ser realizada a utilização do equipamento ou procedimentos fora do padrão, nem seu uso excessivo sem a devida manutenção. Dessa forma, é essencial que ocorram calibrações e manutenções regulares, principalmente, quando utilizado em diversos locais e por diferentes pesquisadores.

Ante o exposto, foi validado o uso do equipamento BST para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. Ainda, como aspecto de ineditismo no contexto mundial, propõe-se a sua utilização associada ao mapeamento geotécnico, uma vez que, por se tratar de um ensaio rápido e de campo, viabiliza o mapeamento de uma área maior em menos tempo, sendo possível atribuir dado do parâmetro de resistência para áreas consideradas mais homogêneas quanto a suas características geotécnicas, em relação às adjacentes, e mantendo a confiabilidade dos dados obtidos com precisão semelhante ao ensaio mais utilizado para esse fim, o Cisalhamento Direto.

Dessa forma, com o intuito de traduzir a heterogeneidade do solo, foi elaborado um banco de dados georreferenciado para a área em estudo por meio da execução de 20 ensaios BST distribuídos espacialmente. Analisando-se a variação entre os resultados dos parâmetros de resistência a cisalhamento para cada unidade geotécnica, observou-se que a maior variação foi de 6,6kPa entre os valores de intercepto de coesão obtidos entre os pontos ensaiados na unidade Cde, e a menor variação foi de 1,1kPa entre os pontos da unidade Cf. Em relação ao ângulo de atrito, a maior variação foi de 4,8° entre os ensaios realizados na unidade Cpi, e a menor variação foi de 1,1° na unidade Cde. Esse fato demonstra a baixa variabilidade dos resultados obtidos pelo BST na área de cada unidade geotécnica.

Os parâmetros obtidos compuseram um banco de dados georreferenciado da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, totalizando 37 pontos. A partir dele, foi possível a experimentação de diferentes formas de distribuição dos dados geotécnicos nas modelagens matemáticas, sendo elaborados 15 cenários. Ressalta-se que parâmetros obtidos por meios precisos devem ser espacializados para a área homogênea assumindo certo grau de subjetividade, sobretudo em escalas menores, uma vez que os resultados correspondem ao valor pontual de uma amostra de solo heterogêneo.

Foram geradas 210 modelagens de suscetibilidade a deslizamentos translacionais com o modelo SHALSTAB (105 de cada resolução espacial). De modo geral, observou-se que a variação na espacialização dos parâmetros dos solos influencia na ocorrência das sete classes de estabilidade, sobretudo nas extremas: incondicionalmente estável e instável. Logo, a definição desses dados de entrada mostra-se uma etapa importante na análise de suscetibilidade. Observou-se uma maior diferença no percentual de ocorrência das classes extremas entre os cenários menos (E), com elevado porcentual de áreas estáveis, e mais conservadores (F), com

elevado porcentual de áreas instáveis. Dessa forma, apresentaram elevado porcentual de área das superfícies de ruptura nessas classes.

É importante pontuar que todas as modelagens apresentaram cicatrizes de deslizamentos localizadas nas áreas classificadas como estáveis pelo SHALSTAB. Nesse contexto, observou-se que o modelo possui melhor desempenho na classificação das áreas instáveis em detrimento das classes estáveis, uma vez que apenas 1 classe (incondicionalmente estável) abrange grande área da bacia hidrográfica, dessa forma, há uma superestimação das áreas assim classificadas. Cabe destacar que os modelos se caracterizam por ser uma representação simplificada de um sistema, correspondendo a uma aproximação da realidade. Dessa forma, mesmo com a coleta de dados geotécnicos *in situ*, na área de estudo, os mapas gerados não substituem o trabalho de campo. Eles devem ser utilizados para direcionar as inspeções por profissional especializado quanto aos fatores ambientais relacionados às áreas classificadas como instáveis e estáveis e na identificação das condições geológicas, geomorfológicas e geotécnicas propícias à instabilização das encostas.

As modelagens que melhor se ajustaram à situação real (do desastre natural de novembro de 2008) da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foram aquelas obtidas sem a espacialização dos parâmetros geotécnicos, ou seja, nas quais foi utilizado um único valor de intercepto de coesão, ângulo de atrito e peso específico saturado para toda a área da bacia hidrográfica, calculado por meio da média ponderada utilizando a área das unidades geotécnicas no cenário C e dos modelados de relevo no cenário D, na escala 1:10.000.

Nesse sentido, em relação à hipótese levantada nesta pesquisa, de que o uso de unidades geotécnicas, para a coleta de dados e na parametrização, seria a forma de maior capacidade preditiva, à escala de bacia hidrográfica, conclui-se ser satisfatória a obtenção do dado geotécnico de forma pontual (ensaio), mas espacializada por unidades geotécnicas de interesse, evitando-se sua obtenção de forma aleatória. Se possível, associada aos modelados de relevo. Além disso, o uso dos polígonos das unidades geotécnicas foi essencial na identificação de um valor médio ponderado, destacando a importância do mapeamento geotécnico na orientação da magnitude dos parâmetros de entrada que possam retratar, mesmo que de maneira generalizada, as características do subsolo.

Entende-se que uma etapa indispensável ao mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos é a validação, pois permite estabelecer credibilidade aos cenários elaborados.

Dessa forma, realizou-se a validação a partir de 526 superfícies de rupturas translacionais estimadas nas cicatrizes de deslizamentos ocorridos em novembro de 2008. Para isso, entendeu-se como mais adequado o cruzamento dos polígonos dessas superfícies de ruptura com o cenário de suscetibilidade, definindo a área de cada classe do SHALSTAB localizada no interior da superfície de ruptura.

Contudo, a partir desse método adotado, ocorreu uma elevação de áreas classificadas como estáveis nas superfícies de ruptura pois, embora ocorram 95% de *pixels* classificados como instáveis em seu interior, os 5% de *pixels* estáveis também serão contabilizados, dessa forma, observou uma redução na capacidade preditiva das modelagens em relação a outros métodos empregados. Isso foi retratado na forma das curvas de predição e na classificação dos valores de Área Abaixo da Curva (AAC) máxima, sendo 45 modelagens classificadas como aceitável, 59 como fraca e 106 como muito fraca.

Devido a isso, a fim de comparar o cenário de suscetibilidade a deslizamentos translacionais com outros trabalhos desenvolvidos na mesma área de estudo, foi realizada a validação do cenário com o mesmo método utilizado por outros autores. Nesse contexto, o cenário que apresentou a maior capacidade preditiva, $C z = 5m$ (*pixel* de 1m), foi apresentado em três classes com cores semaforicas, o vermelho representou a alta suscetibilidade (8% da área, com 86% das superfícies de ruptura), o amarelo a média suscetibilidade (37% da área, com 12% das superfícies de ruptura) e o verde as áreas de baixa suscetibilidade (55% da área, com 2% das superfícies de ruptura).

Apesar de não existir um método padrão de mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos no país, entende-se que essa pesquisa pode contribuir ao tema, uma vez que foi proposto e validado um método bastante difundido na Região Sul, especialmente no Estado de Santa Catarina, a partir da utilização do mapeamento geotécnico de grandes áreas na orientação dos locais de execução de ensaios para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, validando-se a aplicabilidade do equipamento BST, a fim de inseri-los em modelagens matemáticas, e a validação dos cenários por meio da curva de predição e do cálculo da AAC a partir de um inventário de cicatrizes. Destaca-se que parte deste método proposto foi empregado na elaboração das Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização frente aos Desastres Naturais elaboradas por meio de uma parceria entre o Ministério das Cidades e a Universidade Federal de Santa Catarina, apresentando resultados coerentes.

Dessa forma, os resultados obtidos com esta pesquisa apontam a validade do método adotado, e os produtos gerados podem apresentar subsídios ao ordenamento territorial, além de ser aplicado em outros municípios e bacias hidrográficas, o qual poderá contribuir na redução na incidência de desastres naturais, reduzindo a necessidade de ações corretivas, já que apresenta a capacidade de orientar de forma adequada a expansão urbana com base nas restrições impostas pelo meio físico.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuação e aprofundamento da pesquisa, recomenda-se a realização de trabalhos futuros nos seguintes temas:

- Analisar, a partir de um MDE elaborado anteriormente ao desastre natural e com a mesma resolução espacial do MDE disponibilizado pela SDE/SC, de 2012, as diferenças nos resultados das modelagens de suscetibilidade quanto às feições deixadas no relevo pelas cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008;
- Elaborar, em outras bacias hidrográficas, os cenários com a distribuição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para utilização nas modelagens com o SHALSTAB e validar com um número elevado de cicatrizes de deslizamentos, a fim de comparar com os resultados obtidos nesta pesquisa;
- Elaborar cenários com a variação da espessura do solo mais fidedignos, validando com diversas medições em campo, e avaliar sua influência nas modelagens matemáticas;
- Analisar a influência de diferentes formas de representação gráfica do inventário de cicatrizes e métodos de validação, por exemplo, Matriz de Confusão, Curvas de sucesso e de predição, Curvas ROC, entre outros, na validação das modelagens de suscetibilidade, comparando-os;
- Verificar e caracterizar em campo as áreas identificadas como instáveis e estáveis pelo SHALSTAB a partir do mapa semafórico de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú gerado;
- Validar o mapa semafórico de suscetibilidade a deslizamentos translacionais da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú apresentado nesta pesquisa com um inventário de cicatrizes multitemporal (a partir de novos deslizamentos).

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. E. C. **Avaliação das variáveis mecânicas em solos de encostas naturais de Blumenau, SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 136p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080**: Standard Test Method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 2004. 7p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7181**: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. 2011. 11p.
- ANDRIOLA P., CHIRICO G. B., DE FALCO M., DI CRESCENZO G.; SANTO A. A comparison between physically-based models and a semiquantitative methodology for assessing susceptibility to flowslides triggering in pyroclastic deposits of Southern Italy. **Geografia Física e Dinâmica Quaternária**, n. 32, pp. 213-226. 2009.
- ARAÚJO, J. P. C.; SILVA, L. M.; SILVA, F. A. D.; FERNANDES, N. F. Previsão de escorregamentos translacionais rasos e área de dutos: estudo de caso do maciço do Tinguá na reserva biológica federal do Tinguá (RJ). **Revista Geonorte**, Edição Especial 4, v. 10, n. 1, pp. 224–229. 2014.
- ARISTIZÁBAL, E.; GARCÍA, E.; MARTÍNEZ, C. Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. **Natural Hazards**, v. 78, n. 1, pp. 621-634, 2015.
- ASHLOCK, J. C.; LU, N. Interpretation of Borehole Shear Strength Tests of Unsaturated Loess by Suction Stress Characteristic Curves. **GeoCongress**, ASCE, pp. 2562-2571. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009. 33p.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamentos**: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 162p.

AVANZI, G. D.; FALASCHI, F.; GIANNECCHINI, R.; PUCCINELLI, A. Soil slip susceptibility assessment using mechanical–hydrological approach and GIS techniques: an application in the Apuan Alps (Italy). **Natural Hazards**, v. 50, n. 3, pp. 591-603, 2009.

AVANZI, G. D.; GIANNECCHINI, R.; PUCCINELLI, A. The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperature climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). **Engineering Geology** 73, pp. 215-228, 2004.

AZEVEDO, G. F.; CARVAJAL, H. E. M.; SOUZA, N. M. Avaliação determinística e probabilística da susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos pela aplicação do modelo SHALSTAB. *In*: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), João Pessoa (PB): INPE. **Anais [...]** pp. 5686-5693. 2015.

BARATA, F. E. **Propriedades mecânicas dos solos**: uma introdução ao projeto de fundações. 1ª Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro. 1984.

BARELLA, C. F. **Abordagens estatísticas aplicadas ao mapeamento de susceptibilidade a movimentos de massa**: análise de diferentes técnicas no contexto do quadrilátero ferrífero. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, 2016. 276p.

BECHTUM, T. **Automation and further development of the borehole shear test**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Iowa State University, Iowa, 2012. 194p.

BELLUGI, D.; DIETRICH, W. E.; STOCK, J. D.; KAZIAN, B.; HARGROVE, P. Spatially explicit shallow landslide susceptibility mapping over large areas. Proceedings of the 5th international conference on debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment. **Italian Journal of Engineering Geology and Environment**. 2011.

BENESSIUTI, M. F. **Estudo dos mecanismos de instabilidade em solos residuais de biotita-gnaise da bacia do Ribeirão Guaratinguetá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru (SP), 2011. 128p.

BEGUERÍA, S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. **Natural Hazards**, 37(3), pp. 315-329, 2006.

BEVILAQUA, F. Z. **Estudo de Comportamento geomecânico dos solos residuais de Granito de Florianópolis-SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

BIM, R. **Mapa de susceptibilidade a movimento de massa da microbacia do Ribeirão das Pedras/SC, determinado com ênfase na variação pluviométrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. 222p.

BINI, G. M. P. **Análise das ocorrências de movimentos de massa em litologias do Complexo Luís Alves nos municípios de Ilhota e Gaspar, SC:** subsídios para modelagem matemática de previsão. Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2020. 157p.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slope. **Geotechnique**, 10, pp. 129-150. 1955.

BISHOP, A. W.; HENKEL, D. J. **The measurement of soil properties in the triaxial test.** Londres: Edward Arnold Ltd, 1962.

BISPO, C. O.; LISTO, F. L. R.; SILVA, D. G. Previsão de escorregamentos rasos a partir do modelo SHALSTAB na borda oriental da Chapada do Araripe. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 35, n. 4, pp. 219-230. 2018.

BOEHL, P. E. G. **Algumas observações sobre as propriedades geotécnicas de solos estruturados derivados de granito da Grande Florianópolis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 227p.

BRITO, A. A. S. **Etudo da resistência ao cisalhamento não saturada de um solo residual de sienito: Domo de Lages/SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte e Gestão Territorial), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. 101p.

BRITO, M. M.; WEBER, E. J.; KRIGGER, V. S.; LEITZKE, F. P. Análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de Porto Alegre a partir de registros históricos. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 68/1, pp.1853-1872. 2016.

BROMS, B. B.; WONG, K. S. Landslides. *In*: FANG, H. Y. (ed). **Foundation engineering handbook.** 2ed. Chapman & Hall, New York, pp. 410-446, 1990. 942p.

CAMPOS, L. G. **Variação sazonal do fator de segurança global da estabilidade de um talude de solo residual de diabásio.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. 140p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 5. Ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 1975.

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.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. 207p.

CARRARA, A.; CROSTA, G.; FRATTINI, P. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. **Geomorphology**, n. 94, pp. 353-378. 2008.

CARRENO, C. A. **Mapeamento da aptidão à urbanização da bacia hidrográfica do Rio Ratoles mediante o estudo da erodibilidade dos solos residuais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. 182p.

CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. **Hillslope form and process**. London: Cambridge University Press, 1975. 475p.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (orgs.). **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Ministério das Cidades. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, Brasília, 2007. 176p.

CARVALHO, D. M.; PESSOA, O. A. A.; SILVEIRA, I. A.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T. Aplicação do modelo SHALSTAB para a demarcação de áreas suscetíveis a escorregamentos no município de Itatiaia-RJ. *In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Viçosa. **Anais [...]** pp. 280-286, 2009.

CERRI, L. E. S.; AMARAL, C. P. Riscos Geológicos. *In OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (eds.) Geologia de Engenharia*. ABGE, São Paulo, pp. 301-310. 1998.

CERVI, F.; BERTI, M.; BORGATTI, L.; RONCHETTI, F.; MANENTI, F.; CORSINI, A. Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy). **Landslides**, n. 7, pp. 433-444. 2010.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Carta do Meio Ambiente e de sua dinâmica**. Baixada Santista. Metodologia André Journaux, pp. 1-33. 1991.

CHRIST, C. E. **Mapeamento geotécnico e análise da suscetibilidade a deslizamentos na Ilha de Santa Catarina**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. 191p.

CHRISTOFOLLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1979. 188p.

CHUNG, C. F.; FABBRI, A. G. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 65(12), pp. 1389-1399, 1999.

CHUNG, C. J. F.; FABBRI, A. G. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. **Natural Hazards**. v. 30, pp. 451-472, 2003.

CONTE, M. A. G.; BRESSANI, L. A.; STRAUSS, M. Estudo da Ruptura de um Talude Rodoviário em Solo Residual de Migmatito em São José/SC. *In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas 2017*. **Anais [...]** Florianópolis: ABMS, 2017.

CONTESSI, R. J. **Borehole Shear Test: uma comparação com o ensaio de Cisalhamento Direto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016. 107p.

CORREIA, V. M. **Aplicação de uma nova metodologia de mapeamento de susceptibilidade à movimentos gravitacionais de massa em Santo Amaro da Imperatriz-SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 112p.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa** – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES. PIMENTEL, J.; SANTOS, T. D. (coord.) CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 2018. 213p.

DAGNESE, L. L. SANTOS JUNIOR, W. S. **Análise de estabilidade de talude em corte no município de Alfredo Wagner**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2017. 87p.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8ª edição, Ed. Thomson Learning, São Paulo, 2011.

DEGERING, A. D. **Aplicação, análise e validação de métodos para mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão do Baú, Ilhota/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 83p.

DEMARTINO, N. M. **Aplicação do modelo SHALSTAB no mapeamento de deslizamentos rasos na sub-bacia do rio comprido - Joinville/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 88p.

DEMOULIN, A.; CHUNG, C. Mapping landslide susceptibility from small datasets: A case study in the Pays de Herve (E Belgium). **Geomorphology**, 89, pp. 391-404, 2007.

DENG, X.; LI, L.; TAN, Y. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Susceptibility Mapping by Considering Structural Similarity. **International Journal of Geo-Information**. 6(4), 103, 2017.

DEUCHER, L.; KUNZEL, R. K. **Análise de estabilidade de talude - obra da terceira faixa da via expressa de Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019. 108p.

DIAS, H. C.; DIAS, V. C.; VIEIRA, B. C. Landslides and morphological characterization in the Serra do Mar, Brazil, *In: Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, pp. 381-836. 2016.

DIAS, M. A. F. S. **As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina**: Um estudo de caso visando à melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos. São José dos Campos: INPE, 2009. 67p.

DIAS, R. D. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, pp. 51-55. 1995.

DIAS, R. D.; PARIZOTO, D.; ESPÍNDOLA, M. S. **Mapeamento geotécnico de grandes áreas, exemplo na região do Morro do Baú**. FAPESC/UNISUL, Florianópolis, 2015. 93p.

DIETRICH, W. E.; ASUA R. R.; ORR, J. C. B.; TRSO, M. **A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California**. Stillwater Ecosystem, Watershed and Riverine Sciences, Berkeley, 59 pp, 1998.

DIETRICH, W. E.; BELLUGI, D.; ASUA, R. R. Validation of the Shallow Landslide Model, SHALSTAB, for Forest Management. **Water Science and Application**, v. 2, pp. 195-227. 2001.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB**: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. National Council for Air and Stream Improvement. 1998. 26p.

DIETRICH, W. E.; REISS, R.; HSU, M. L.; MONTGOMERY, D. R. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. **Hydrological Processes**, v. 9, pp. 383-400. 1995.

DNIT. Departamento nacional de infraestrutura de transportes. **Monitoramento do plano nacional de manutenção rodoviária: plano de adaptação de rodovias federais a desastres naturais recorrentes**. Florianópolis: UFSC; Brasília: DNIT. Termo de execução descentralizada n. 935/2014-00. (Relatório parcial, v. 2, 2R05). 2016.

DNIT. Departamento nacional de infraestrutura de transportes. **Monitoramento do plano nacional de manutenção rodoviária: plano de adaptação de rodovias federais a desastres naturais recorrentes**. Florianópolis: UFSC; Brasília: DNIT. Termo de execução descentralizada n. 935/2014-00. (Relatório parcial, v. 2, 2R06). 2017.

DOMINGUES, R. T.; SBROGLIA, R. M.; RIGOTTI, J. A. N.; HULLER, J.; CHRIST, C. E.; HIGASHI, R. A. R. Comparativo entre o ensaio de cisalhamento direto e o borehole shear test na obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. *In*: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL, ABMS, **Anais [...]** Joinville, 2019.

ÉGAS, H. M. **Análise dos movimentos de massa na microbacia do Ribeirão do Baú, Ilhota, SC, com base em critérios da geomorfologia e geologia**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 169p.

ESPÍNDOLA, M. S. **Ensaio triaxiais de grande escala em amostras de enrocamentos da UHE Machadinho**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 443p.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, 27, pp. 861-874, 2006.

FERNANDES, N. F., AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 3ª edição, Rio de Janeiro: Bertrand, pp. 123-194. 2000.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n.1, pp. 51-71. 2001.

FLACH, M. K. **Análise da estabilidade de um talude em solo natural com avaliação dos parâmetros de resistência em diferentes profundidades, Nova Trento - SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 107p.

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

FLORES, J. A. A. (coord.) *et al.* **Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais em municípios do estado de Santa Catarina**. Universidade Federal de Santa Catarina, Ministério das Cidades, 2015-2019.

FLORES, J. A. A. (coord.) *et al.* **Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais no município de Ilhota, estado de Santa Catarina**. Relatório Final. Universidade Federal de Santa Catarina, Ministério das Cidades, 2017. 82p.

FONTANA, G.; BORGA, M.; TAROLLI, P. Modellazione dei processi di instabilità superficiale. *In*: AA.VV. **La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione**: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto, CATCHRISK, pp. 95-112, 2005.

FORNASA, T. L. **Mapeamento geológico-geotécnico e análise de suscetibilidade a movimentos de massa em Braço do Norte – SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 142p.

- FORNASA, T.; MULLER, S. V.; ESPÍNDOLA, M.; ZANINI, M. Análise da Estabilidade de Taludes em uma Área de Expansão no Município de Brusque-SC. *In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas 2017. Anais [...]* Florianópolis: ABMS, 2017.
- FREIRE, E. S. M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Construção**, Rio de Janeiro, n.8, pp. 10-18. 1965.
- GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia. U.S.A. *In: Earth surface process and landforms*, v.18, pp. 579-591. 1993.
- GARCIA, R. A. C.; ZÊZERE, J. L.; OLIVEIRA, S. M. C. A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. **Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos**, V, APGeom, Lisboa, pp. 265-279. 2007.
- GERENTE, J.; BINI, G. M. P. ; LUIZ, E. L. Análise da variável forma de relevo como condicionante de movimento de massa: estudo de caso da bacia do Rio Saltinho em Gaspar/SC. **Revista Equador**, v. 4, pp. 993-1002. 2015.
- GERENTE, J.; LUIZ, E. L.; SANTO, M. A. D. Utilização do SHALSTAB como ferramenta para o diagnóstico preliminar da suscetibilidade a deslizamentos rasos no baixo vale do rio Luís Alves – SC. **Ambiência**, v.10, pp. 333-350. 2014.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Tensões em Solos**. Disponível em: <<http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/tensoes.pdf>>. Faculdade de Engenharia Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 83p.
- GLADE, T.; CROZIER, M. J. The nature of landslide hazard impact. *In: GLADE, T.; ANDERSON, M.; CROZIER, M. J. (eds.), Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, pp. 41-74. 2005.
- GOMES, R. A. T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006. 180p.
- GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; FERNANDES, N. F. Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (Shalstab) em diferentes escalas cartográficas. **Solos e Rochas**, v. 28, n. 1, pp. 85-97, 2005.
- GORSEVSKI, P. V.; GESSLER, P. E; BOLL, J.; ELLIOT, W. J.; FOLTZ, R. B. Spatially and temporally distributed modeling of landslide susceptibility. **Geomorphology**, n. 80, pp. 178-198. 2006.

GOULART, D.; FORNESA, N.; MULLER, V. S.; ESPINDOLA, M. S. Estabilidade de encosta em solo residual granítico em Florianópolis – SC. *In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas 2017. Anais [...]* Florianópolis: ABMS, 2017.

GUESSER, L. H. **Mapeamento geotécnico da área urbana do município de Antônio Carlos/SC aplicado ao planejamento do uso e ocupação dos solos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** Edgard Blucher, 1984. 194p.

GUIMARÃES, R. F. **Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico:** adequação e calibração em duas bacias de drenagem. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000. 150p.

GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. Movimentos de Massa. *In: FLORENZANO, T. G. (org.). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.* São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318p.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, 69(1-2), pp. 99-108. 2003.

GUIMARÃES, R. F.; VIEIRA, B. C.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. Avaliação de parâmetros morfológicos das cicatrizes dos escorregamentos da bacia do rio Quitite (RJ). **Geosul (UFSC)**, v. 14, pp. 316-320. 1998.

GUZZETTI, F. **Landslide Hazard and Risk Assessment:** Concepts, Methods and Tools for the Detection and Mapping of Landslides, for Landslides Susceptibility Zonation and Hazard Assessment, and for Landslide Risk Evaluation. PhD Thesis, Mathematchi naturwissenschaftlichen Fakultät, Universtität Bonn, Bonn, Germany, 2005. 373p.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**. 31, pp. 181-216. 1999.

HANDY GEOTECHNICAL INSTRUMENTS, Inc. **Borehole Shear Test.** Disponível em: <<https://www.handygeotech.com/borehole/>>. Acesso em: 08 mai 2019.

HANDY, R. L. Borehole shear test and slope stability. *In: CLEMENCE, S. P. (ed.). Use of in situ tests in geotechnical engineering.* ASCE, New York, pp. 161-175, 1986.

HANDY, R. L.; FOX, N. S. A soil bore-hole direct-shear test device. **Highway Research News**, n. 27, pp. 42-51. 1967.

HANLEY, J. A.; MCNEIL, B. J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. **Radiology**, 143 (1), pp. 29-36. 1982.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. Chichester: Pentech, 1985.

HEIDEMANN, M. **Caracterização geotécnica de um solo residual de granulito envolvido em uma ruptura de talude em Gaspar - SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. 178p.

HEIDEMANN, M. **Estudo dos solos de uma encosta instável em São José - SC: intemperismo e comportamento geotécnico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul . 2015. 299p.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006. 486p.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008. 129p.

HUTCHINSON, J. N. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrology. *In*: International Symposium on Landslides, 5, Lausanne, **Anais [...]** pp. 3-29. 1988.

IMAI, H. N.; ROSNIECEK, A. **Mapeamento geotecnico e análise de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos da bacia do rio Ratonas - aplicação do modelo SHALSTAB**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. 155p.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estudo das instabilizações de encostas da Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno de corrida de lama e da prevenção dos seus efeitos**. Relatório IPT, São Paulo. 1991.

IRIGOYEN, A.; CODUTO, D. P. Shear strength of unsaturated soils using the borehole shear test. *In*: WINTER, M. G.; SMITH, D. M.; ELDRED, P. J. L.; TOLL, D. G. **Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development**, pp. 2933-2938. 2015.

KAUL, P. F. T.; FERNANDES, E.; SANTOS NETO, A. **Projeto Gerenciamento Costeiro GERCO - 3º Fase: Geologia**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2002. 63p.

KHOURY, C.; MILLER, G. A. Influence of flooding on Borehole Shear Test. **Results on Unsaturated Soils**, v. 1, pp. 235-246. 2006.

KOBAYASHI, T.; AOKI, S.; KANAMORI, H.; FUKAGAWA, R.; WAKABAYASHI, S.; TSUJI, T. Borehole Geotechnical Testing Tool for Lunar Exploration. *In: Thirteenth ASCE Aerospace Division Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, and the 5th NASA/ASCE Workshop On Granular Materials in Space Exploration, Anais [...]* 2012.

LAMBRECHTS, J. R.; RIXNER, J. J. Comparison of Shear Strength Values Derived from Laboratory Triaxial, Borehole Shear, and Cone Penetration Tests. *In: Laboratory Shear Strength of Soil*. YONG, R. N.; TOWNSEND, F. C. (Eds.), American Society for Testing and Materials, ASTM, pp. 551-565, 1981.

LEHMKUHL, E.; ABREU, S. S. **Análise de estabilidade de talude estudo de caso: talude da NSCTV – comunicação (Florianópolis/SC)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2021, 127p.

LISTO, F. D. L. R.; VIEIRA, B. C. Mapping of risk and susceptibility of shallow landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169–170, pp. 30-44. 2012.

LISTO, F. D. L. R.; VIEIRA, B. C. Análise de condicionantes topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 3, pp. 193-207. 2010.

LOHNES, R. A.; HANDY R. L. Slope Angles in Friable Loess. **The Journal of Geology**, Chicago, USA, 1968.

LONG, P. D. Which soil-investigation methods can we trust: field tests or laboratory tests? *In: ROBERTSON, P. K.; MAYNE, P. W. Geotechnical Site Characterization*. Proceedings of the first international conference on site characterization, Atlanta, Georgia, USA, pp. 1301-1308, 1998.

LOPES, E. S. S. **Modelagem espacial dinâmica aplicada ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista, na escala de 1:10.000**. Tese (Doutorado), IGCE/UNESP, Rio Claro. 2006. 302p.

LUIZ, A. S. **Utilização da modelagem matemática para identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos na Serra das Araras - RJ**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade de Brasília - UnB, 2015. 52p.

LUTENEGGER, A. J. Suggested Method for Performing the Borehole Shear Test. **Geotechnical Testing Journal**, v. 10, n. 1, pp. 19-25. 1987.

LUTENEGGER, A. J.; HALLBERG, G. R., Borehole Shear Test in Geotechnical Investigations. *In: YONG, R. N.; TOWNSEND, F. C. (Eds.). Laboratory Shear Strength of Soil*. ASTM STP 740, American Society for Testing and Materials, pp. 566-578. 1981.

LUTENEGGER, A. J.; TIMIAN, D. A. Reproducibility of Borehole Shear Test Results in Marine Clay. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM, v. 10, n. 1, pp. 13-18. 1987.

LUVIZÃO, G.; CARLESSO, G. C.; HIGASHI, R. A. R.; NIENOV, F. A.; ZAMPIERI, L. Q. Mapeamento Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio do Tigre (Joaçaba/SC). **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 6, pp. 3619-3634. 2020.

MACHADO, W. P. **Análise do comportamento da coesão crítica relacionada à instabilidade de encosta utilizando dados de chuva do sensor TRMM no município de Paraty (RJ)**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade de Brasília - UnB, 2011. 83p.

MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos: INPE, 2003. 228p.

MARTINS, T. D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; CORRÊA, A. C. B.; BATEIRA, C. V. M. Análise dos parâmetros morfológicos de escorregamentos rasos na Serra do Mar, Paraná. **Caminhos de Geografia**, v.18, n.63, Uberlândia, MG, pp. 223-239. 2017.

MASSOCCO, N. S. **Determinação dos parâmetros geotécnicos de solos residuais com ênfase na mecânica dos solos não saturados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. 244p.

MATTEDI, M. A.; FRANK, B.; SEVEGNANI, L.; BOHN, N. O desastre se tornou rotina... *In*: FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (orgs.). **Desastre no vale do Itajaí**. Água, gente e política. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009. 192p.

MATTOS, A. B. **Estado da arte: estudos internacionais sobre o ensaio Borehole Shear Test**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2021. 66p.

MEIRELLES, M. C. E.; DIAS, R. D. Estudo da Erodibilidade de Solos Residuais do Complexo Granito-Gnaissico – Município de Santo Amaro da Imperatriz, SC. *In*: 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados, São Carlos, SP, **Anais [...]** v.1, pp.465-470. 2004.

MELO, C. M. **Efeito da caracterização das unidades geotécnicas no mapeamento das áreas susceptíveis a escorregamentos com modelo SHALSTAB**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MICHEL, G. P. **Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de deslizamentos**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. 164p.

MICHEL, G. P.; GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Critical rainfall to trigger landslides in Cunha River basin, southern Brazil. **Natural Hazards**, v.75, n.3, pp. 2369-2384, 2015.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v.14, n.7, pp. 1266-1277, 2014.

MITCHELL, J. K. In Situ Techniques for Site Characterization. **Site Characterization and Exploration**, American Society of Civil Engineers, New York (USA), pp. 107-129. 1979.

MONTANDON, L. F. **Avaliação da influência da escala do mapa litológico nos modelos de suscetibilidade a escorregamentos, no município de Caeté (MG), utilizando métodos estatísticos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, 2017. 170p.

MONTEIRO, C. L. **Mapeamento das áreas de suscetibilidade a deslizamentos na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016. 117p.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, pp. 1153-1171. 1994.

MONTGOMERY, D. R.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H. M. Regional test of a model for shallow landsliding. **Hydrological Processes**, n. 12, pp. 943-955. 1998.

MUNSELL. **Soil Color Charts**. Baltimore: Munsell Color Company, 1971.

NAU, D. R. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Timbó/SC**. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 226p.

NERY, T. D. **Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Translacionais Rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP)**. Tese (Doutorado em Geografia Física), Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2011. 170p.

NOVELETTO, V. **Análise do controle lito-estrutural nas propriedades geotécnicas e estabilidade de talude de depósitos de colúvio, Rio do Sul, Santa Catarina**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. 80p.

NUNES, G. B. **Estudo da influência das variações sazonais do perfil de sucção no Fator de Segurança ao deslizamento de uma encosta de solo residual de granito e diabásio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. 163p.

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

OLIVEIRA, F. P. **Mapeamento Geotécnico preliminar e aplicação do modelo SHALSTAB na análise de escorregamentos da bacia de Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

OLIVEIRA, R. D. **Estudo e análise da estabilidade de um talude no município de Joinville/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019. 140p.

OLIVEIRA, S. M. C. **Incidência Espacial e Temporal da Instabilidade Geomorfológica na Bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos)**. Doutorado em Geografia. Universidade de Lisboa, Portugal, 2012. 496p.

OLIVEIRA, V. S. **Análise de estabilidade bi e tridimensional de talude estabilizado em solo grampeado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. 170p.

OLIVEIRA, O. M.; HIGASHI, R. A. R.; MARCON, A. F.; IKEDA, T. F.; SCHNEIDER, S. C. R. F.; CATHCART, D.; LOPES, C. H. R.; VIEIRA, S. S.; LANZA, D. S.; VALENTE, A. M. Movimentos de Massa em Taludes Rodoviários da Serra de Corupá/SC. *In: XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas 2017. Anais [...]* Florianópolis: ABMS, 2017.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3 ed. Livros técnicos e científicos S.A, Rio de Janeiro, 2007.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN C. N. **Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00**. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, Canadá, 1998. 68p.

PARIZOTO, D. G. V. **Contribuição dos diferentes fatores aos processos de deslizamento e a influência antrópica no nível de danos do desastre de 2008: o caso do complexo do Morro do Baú - Ilhota/SC**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. 305p.

PASSARELLA, S. M.; MACHADO, F. B.; RIEDEL, P. S.; LOPES, E. S. S.; FERREIRA, M. V.; MOREIRA, M. R.; AZZI, A. A. Análise da relação entre escorregamento e formas de vertentes no município de Cubatão (SP) e seus arredores. **Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 1, pp. 7-20. 2008.

PAUL, L. R. **Identificação de áreas propensas a escorregamentos translacionais nas bacias do Taboão e Bela Aliança, Rio do Sul – SC**. Trabalho de Conclusão de Curso de

Engenharia Sanitária do Centro de Educação Superior do Alto Vale do Itajaí, da Universidade do Estado de Santa Catarina, Ibirama, 2017. 107p.

PAUL, L. R.; ABATTI, B. H.; MICHEL, G. P. Análise de desempenho dos modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS para a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas bacias Taboão e Matador, Rio do Sul (SC). *In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu (PR), Anais [...] 2019.*

PAUL, M. E. **Avaliação de dois sistemas de contenção para implantação em taludes:** estudo de caso aplicado a um talude-tipo da zona industrial norte do município de Joinville – SC. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021. 101p.

PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/PR uma abordagem geopedológica.** Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. 220p.

PECAPEDRA, L. L. **Estudo da resistência ao cisalhamento não saturada de solos residuais de granito e diabásio de Florianópolis/SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 201p.

PEREIRA, M. **Ilhota, 28 de novembro de 2008: Diário de uma tragédia.** HB, Blumenau, 2009. 272p.

PERUZZO, R. S. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos no setor norte do município de Blumenau - SC.** Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 166p.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** SP: Oficina de Textos, 2000. 247p.

PORTO, C. G. Intemperismo em Regiões Tropicais. *In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (orgs). Geomorfologia e Meio Ambiente.* Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, pp. 25-58. 2003.

RAIMUNDO, H. A. **Aspectos geotécnicos e pluviométricos associados a instabilidade de encostas em Florianópolis - SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. 343p.

RAMOS, V. M. **A modelagem matemática no estudo dos movimentos de massa:** aplicação de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos na área do Subúrbio Ferroviário de Salvador (BA). Dissertação (Mestrado em Geografia), Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

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. pp. 49-67. 2002.

REGINATTO, G. M. P. **Aplicação do modelo Shalstab para identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais na bacia do rio Cunha, Rio dos Cedros – SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013.

REDIVO, A. L.; RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T. Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na BR 256 no município de Ouro Preto - MG. *In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia, UFSM, Anais [...]* pp. 31-46. 2004.

REMONDO, J.; GONZÁLEZ, A.; TERÁN, J. R. D.; CENDRERO, A.; FABBRI, A.; CHUNG, C. F. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in northern Spain. **Natural Hazards**, v. 30, n.3, pp. 437-449, 2003.

RENEAU, S. L.; DIETRICH, W. E. Size and location of colluvial in a steep forested landscape. **Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim (IAHS Publ.)** 165. pp. 39-47. 1987.

RIFFEL, E. S.; RUIZ, L. F. C.; GUASSELLI, L. A. Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos a partir de mineração de dados e do modelo SHALSTAB. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/9, pp. 1805-1818. 2016.

RIGOTTI, J. A. N. **Análise de deslizamento rotacional e translacional de um cambissolo de substrato de depósito de encosta na bacia do Itacorubi em Florianópolis / SC.** Trabalho Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. 112p.

RODRIGUEZ, J. N. **Análise geoestatística multi-pontos.** Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Instituto de Matemática e Estatística, São Paulo, 2013. 103p.

ROESNER, F. J. **Retroanálise e proposta de estabilização de um talude da rodovia SC-435.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. 87p.

ROSA, C. **Análise temporal da expansão da mancha urbana e mapeamento de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa no município de Tubarão - SC.** Trabalho Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. 102p.

ROSA, R. O. **Projeto Gerenciamento Costeiro GERCO - 3º Fase: Geomorfologia.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2002. 56p.

ROSOLEM, G. P. N. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na bacia do Rio Forquilhas – São José-SC.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. 164p.

ROSOLEM, G. P. N.; ROSENFELDT, Y. A. Z.; LOCH, C.; HIGASHI, R. A. R. A influência da qualidade dos produtos cartográficos para análise de deslizamentos translacionais através da aplicação do modelo SHALSTAB. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69/1, pp. 43-60. 2017.

ROVANI, M. M.; MACHADO, T. M. **Análise comparativa para contenção de taludes: muro de flexo compressão e gabião estudo de caso: São José/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2018. 136p.

SAKAMOTO, M. Y.; GUESSER, L. H.; CONTESSI, R. J.; HIGASHI, R. A. R.; MÜLLER, V. S.; SBROGLIA, R. M. Use of a borehole shear test method for geotechnical mapping of landslide risk areas. **Landslides and Engineered Slopes**. Experience, Theory and Practice – Aversa *et al.* (Eds). Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy. p. 1783-1790. 2016.

SALUM, B. R. **Levantamento dos condicionantes geológicos e geotécnicos de um talude rodoviário afetado por um deslizamento no bairro Saco Grande/Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. 89p.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Defesa Civil. **Relatório de 31 dez**. Santa Catarina, SC: Secretaria de Estado da Defesa Civil; 2008. Disponível em: <<http://www.desastre.sc.gov.br>>. Acesso em: 15 set 2011.

SANTOS, A. A. **Avaliação de solo reforçado - estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. 172p.

SANTOS, A. R. **A Grande Barreira da Serra do Mar – da Trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Bandeirantes**. Ed. O Nome da Rosa, São Paulo. 2004. 122p.

SANTOS, E. V. **Suscetibilidade a movimentos de massa na microbacia do Ribeirão Máximo, município de Luis Alves, SC**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental), Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. 125p.

SANTOS, G. T. **Integração de informações geológicas, pedológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997.

SAULNIER, G. M.; BEVEN, K.; OBLED, C. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 202, pp. 158–172, 1997.

SBROGLIA, R. M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. 187p.

SBROGLIA, R. M.; HIGASHI, R. A. R.; ESPINDOLA, M. S.; MULLER, V. S.; BETIATTO, P. Use of borehole shear test to obtain shear strength data: comparison to direct shear test. *In: XIII IAEG Congress, 2018, San Francisco. IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings*, San Francisco, California, v.6. Switzerland: Springer Nature. pp. 145-151. 2018a.

SBROGLIA, R. M.; HIGASHI, R. A. R.; MÜLLER, V. S.; ESPÍNDOLA, M. S.; FLORES, J. A. A. Método de Mapeamento das Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Utilizado na Elaboração de Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização. *In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE 2017, Anais [...] ABMS, Florianópolis, 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* 15, pp. 2093–2106. 2018b.

SCHROEDER, G. S. **Análise Tectônica da Bacia do Itajaí**. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. 109p.

SCHWARZ, H. **Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos no município de Ibirama - SC**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Sanitária do Centro de Educação Superior do Alto Vale do Itajaí, da Universidade do Estado de Santa Catarina, Ibirama, 2016. 96p.

SEEFELDER, C. L. N.; KOIDE, S.; MERGILI, M. Does parameterization influence the performance of slope stability model results? A case study in Rio de Janeiro, Brazil. *Landslides*, 2016.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and processes**. Oxford University Press Inc., New York, 2^o ed., 1993. 450p.

SENES, J. **Estudo de caso: análise da estabilidade de um muro de contenção com patologias**. Trabalho Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018. 109p.

SESTINI, M. F. **Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba-SP utilizando imagens TM-Landsat e SIG**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), São José dos Campos: INPE, 2000. 140p.

SEVERO, D. L. A meteorologia do desastre. *In: FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (orgs.). Desastre no vale do Itajaí. Água, gente e política*. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009. 192p.

SHEPARD, F. P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, Okla, 24 (3), pp. 151-158. 1954.

SILVA, D. C. O. **Aplicação do modelo SHALSTAB na previsão de deslizamentos em Petrópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. 132p.

SILVA, E. L.; GOMES, R. A. T.; GUIMARAES, R. F.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Emprego de modelo de susceptibilidade a escorregamentos rasos para gestão de riscos de desastres no município de Vitória-ES. **Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 1, pp. 119-132. 2013.

SILVA, F. K. **Caracterização física e mecânica de solo residual de gnaiss por meio de ensaios de campo e laboratório - Santo Amaro da Imperatriz, Santa Catarina**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. 491p.

SILVA, R. S. R. **Retroanálise de um deslizamento de talude ocorrido no morro da Praia Mole/SC-406**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. 97p.

SILVA, R. V. **Desenvolvimento de um modelo hidrológico distribuído por meio de células voronoi com consideração das profundidades do solo**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. 226p.

SILVEIRA, L. R. **Avaliação de vulnerabilidades por dois diferentes métodos e mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. 216p.

SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; O' LOUGHLIN, C. L. **Hillslope stability and Land Use**. American Geoph. Union, Washington D.C., 1985. 140p.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, 2(1): pp. 79-97, 2012.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards**, n. 53, pp. 313-332, 2010.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L.; CUOMO, S. Un'applicazione dei modelli di innesco su area vasta sede di frane rapide in terreni piroclastici. *In: Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica – IARG, Italia, Pisa, Anais [...]* 2006.

SOUZA, A. M. S. **Mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos rasos na região da bacia do Rio Camboriú**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. 117p.

SWETS, J. A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. **Science**, 240 (4857), pp. 1285-1293, 1988.

TABALIPA, L. K. **Aplicação do modelo SHALSTAB para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais**: estudo de caso de Jaraguá do Sul/SC. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. 150p.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L.E.S; ROCHA, M.C.M. Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar no município de Cubatão. *In*: 5º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE. **Anais [...]** 1987.

THUILLER, W.; LAFOURCADE, B.; ARAUJO, M. **Presentation Manual for BIOMOD**. Université Joseph Fourier, Laboratoire d'Écologie Alpine, Grenoble, France, 2010, 35p.

TOMAZZOLI, E. R.; FLORES, J. A. A.; BAUZYS, F. Movimentos de massa ocorridos no evento de novembro de 2008, no entorno do Morro do Baú, Vale do Itajaí (SC): caracterização geológico-geomorfológica. *In*: 5º COBRAE- Conferência Nacional de Estabilidade de Encostas. São Paulo, **Anais [...]** 2009.

TOMAZZOLI, E. R.; PARIZOTO, D. G. V.; ABREU, J.; PELLERIN, J. R. G. M. **Análise e mapeamento das áreas de risco a movimentos de massa e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves (Complexo do Morro do Baú), SC**. FAPESC - Convênio 16319/2010-8. UFSC, Florianópolis, 2012. 207p.

TOMINAGA, L. K. Análise e Mapeamento de Risco. *In*: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.) **Desastres Naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, pp. 111-146. 2009.

TONIN, F. B. **Notas de Aula - Mecânica dos Solos**. Unidade 9 – Resistência ao Cisalhamento dos Solos. Faculdade Sudoeste Paulista (FSP), Avaré, pp. 164-203. 2014.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landslide types and processes**. U. S. Department of the Interior. Fact Sheet pp. 2004-3072. 2004.

VANACÔR, R. N.; ROLIM, S. B. A. Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, pp. 15-28. 2012.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo, 1977. 509p.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. *In*: R.J. Schuster and R.J. Krizek (eds), **Landslides, Analysis and Control**. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington, DC. Special Report 176, **Anais [...]** pp. 11-33. 1978.

VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 193p.

VITTO, R. **Análise do comportamento geológico-geotécnico aplicada à estabilidade de um talude – Camboriú, SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 104p.

VITTO, R.; SILVA, C. S.; SILVA, R. J.; ESPÍNDOLA, M. S. Avaliação Geológico-Geotécnica da Estabilidade de um Talude em Solo Residual de Xisto: Estudo de Caso no Município de Brusque- SC. VII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas 2017. **Anais...** Florianópolis: ABMS, 2017.

WATERKEMPER, J. C.; BORGES, A. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.C.; ESPÍNDOLA, M. S.; MULLER, V. S. Análise de estabilidade de uma encosta em solo residual de xisto: Estudo de caso no município de Brusque-SC. *In*: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas 2017. **Anais [...]** Florianópolis: ABMS, 2017.

WESTEN, C. J. V.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. **Engineering Geology**, 102, pp. 112-131, 2008.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas da Serra do Mar- Brasil. **Revista Solos e Rochas**, v. 12, São Paulo: ABGE, pp. 27-36. 1989.

YANG, H. **Soil slope stability investigation and analysis in Iowa**. Dissertation, Civil Engineering (Geotechnical Engineering), Iowa State University. 2005.

ZAIN DAN, R. T.; FERNANDES, N. F. Zoneamento de susceptibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego da Independência - Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.10, n.2, 2009.

ZÊZERE, J. L. Landslide Susceptibility Assessment Considering Landslide Typology. A Case Study in the Area North of Lisbon (Portugal). **Natural Hazards and Earth System Science**, 2, pp. 73-82, 2002.

ZÊZERE, J. L. **Predição probabilística de movimentos de vertente na escala regional**. Actes de les Jornades sobre Terrasses i Prevenció de Riscos Natural, Department de Medi Ambient, Mallorca, Espanha, pp. 17-30, 2006.

ZIMMERMANN, D. M. **Mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamento da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira e do rio da Prata – Joinville/SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. 188p.

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**,13, pp. 559-573. 2013.

APÊNDICE A – Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos na zona costeira de Santa Catarina.

Município	Tipo substrato	Tipo ensaio	Coesão [kPa]		Ângulo de atrito [°]		Peso esp. [kN/m ³]		Fonte
			<i>Natural</i>	<i>Inundado</i>	<i>Natural</i>	<i>Inundado</i>	<i>Nat.</i>	<i>Sat.</i>	
Águas Mornas	Residual de anfibólio	CD		11,10		33,0	18,00		Flores (2015-2019)
Águas Mornas	Residual de anfibólio	CD		12,90		29,1	14,50		Flores (2015-2019)
Águas Mornas	Residual de granito	CD		4,50		30,2	14,00		Flores (2015-2019)
Águas Mornas	Residual de granito	CD		12,80		33,9	17,69		Roesner (2015)
Alfredo Wagner	Residual de arenito	CD		14,80		26,2	19,60	20,60	Flores (2015-2019)
Alfredo Wagner	Depósito de encosta	CD		15,20		27,6	17,40	18,40	Flores (2015-2019)
Alfredo Wagner	Depósito de encosta	CD		17,30		27,9	19,30	20,30	Flores (2015-2019)
Alfredo Wagner	Residual de folhelho	CD		8,70		33,7	18,10	19,10	Flores (2015-2019)
Alfredo Wagner	Residual de diamectito	CD		7,30		33,4	17,30	18,30	Flores (2015-2019)
Alfredo Wagner	Residual de folhelho	CD		2,50		34,3	18,20		Flores (2015-2019)
Alfredo Wagner	Residual de arenito e pelito	CD		8,80		21,6	17,75		Dagnese; Santos Junior (2017)
Alfredo Wagner	Residual de arenito e pelito	CD		10,90		27,5	19,02		Dagnese; Santos Junior (2017)
Antônio Carlos	Residual de gnaisse	CD		10,33		32,2	17,60		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		5,31		33,9	13,70		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		10,24		30,0	15,30		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de gnaisse	CD		12,83		31,4	15,80		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		3,86		33,0	17,40		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		5,52		32,2	16,40		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		10,80		30,1	17,30		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		9,87		36,2	18,10		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		12,84		32,2	16,40		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		6,49		35,0	17,60		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		10,04		36,2	18,30		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		8,21		32,4	16,70		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		10,03		33,2	17,90		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		7,60		29,7	16,20		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		11,63		30,1	16,20		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		8,94		40,0	17,30		Guesser (2016)

Antônio Carlos	Residual de granito	CD		9,55		29,8	17,20		Guesser (2016)
Antônio Carlos	Residual de granito	CD		11,49		32,6	17,10		Guesser (2016)
Araranguá	Residual de siltito e arenito	CD		5,30		28,1	17,30		Flores (2015-2019)
Araranguá	Residual de siltito e arenito	CD		7,40		26,4	17,90		Flores (2015-2019)
Araranguá	Sedimentos quaternários	CD		1,30		36,8	19,30		Flores (2015-2019)
Balneário Camboriú	Residual de xisto	CD		0,00		17,1	19,20		Flores (2015-2019)
Balneário Camboriú	Residual de xisto	CD		4,83		24,5	16,80		Flores (2015-2019)
Balneário Camboriú	Sedimentos quaternários	CD		10,86		34,2	16,30		Flores (2015-2019)
Balneário Camboriú	Residual de granito	CD		2,10		36,7	18,20		Flores (2015-2019)
Balneário Camboriú	Residual de migmatito	CD		11,40		31,5	17,00		Flores (2015-2019)
Balneário Camboriú	Residual de granito	CD		4,00		34,7	18,30		Flores (2015-2019)
Balneário Camboriú	Residual de granito	CD		6,30		31,8	17,00		Flores (2015-2019)
Biguaçu	Residual de granito	CD		14,70		28,6	16,50		Flores (2015-2019)
Biguaçu	Residual de granito	CD		16,70		21,5	15,00		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de arenito	CD		14,30		37,0	18,50	21,00	Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de arenito	CD		7,80		32,0	19,60	21,00	Flores (2015-2019)
Blumenau	Depósito de encosta	CD		11,60		27,7	16,90	18,00	Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		11,70		31,4	12,30	15,90	Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		3,80		30,4	12,90	16,70	Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de granito e migmatito	CD		23,90		41,4	19,70		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		5,90		30,7	15,10		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		13,80		33,6	18,70		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gabro	CD		12,80		25,1	14,67		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		23,50		26,0	18,13		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de ultramáfica	CD		23,70		24,5	17,60		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de conglomerado	CD		20,30		23,0	19,00		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de conglomerado	CD		9,90		26,5	16,30		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de pelito e siltito	CD		11,80		32,0	18,70		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de arenito e siltito	CD		15,80		22,7	17,90		Flores (2015-2019)

Blumenau	Residual de arenito e siltito	CD		19,40		26,0	17,77		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de arenito	CD		10,80		21,3	15,97		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		13,80		26,4	16,93		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		8,10		28,0	15,50		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de granito e migmatito	CD		14,70		21,8	14,80		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gabro	CD		4,70		33,2	17,13		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de gabro	CD		15,80		34,5	17,23		Flores (2015-2019)
Blumenau	Depósito de encosta	CD		6,00		32,0	16,67		Flores (2015-2019)
Blumenau	Depósito de encosta	CD		15,00		30,1	16,57		Flores (2015-2019)
Blumenau	Residual de granito e migmatito	CD		23,90		41,4	20,50		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		5,90		30,7	15,10		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		13,80		33,6	18,70		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gabro	CD		12,80		25,1	14,70		Alves (2018)
Blumenau	Residual de arenito e siltito	CD		10,20		26,4	16,80		Alves (2018)
Blumenau	Residual de arenito e siltito	CD		11,80		32,0	18,80		Alves (2018)
Blumenau	Residual de arenito e siltito	CD		15,80		22,7	18,00		Alves (2018)
Blumenau	Residual de arenito e siltito	CD		19,40		26,0	17,80		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		13,80		26,4	16,90		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		8,10		28,0	15,50		Alves (2018)
Blumenau	Residual de migmatito	CD		14,70		21,8	14,80		Alves (2018)
Blumenau	Residual de granito e migmatito	CD		4,70		33,2	17,10		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gabro	CD		15,80		34,5	17,20		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		6,00		32,0	16,70		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		15,00		30,1	16,60		Alves (2018)
Blumenau	Residual de gabro	CD		12,8		25,1			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		8,10		28,0			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de piroxenito	CD		38,37		24,7			Peruzzo (2018)

Blumenau	Residual de granito-migmatito	CD		14,20		22,2			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		24,00		25,5			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de granito	CD		5,14		29,3			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de piroxenito	CD		19,22		24,5			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de gabro	CD		16,10		34,3			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		13,80		33,6			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de gnaiss	CD		11,78		33,0			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de piroxenito	CD		23,60		24,6			Peruzzo (2018)
Blumenau	Residual de granito-migmatito	CD		20,64		27,6			Peruzzo (2018)
Botuverá	Residual de argilito	CD		34,50		38,2	19,20		Flores (2015-2019)
Botuverá	Residual de argilito	CD		9,10		31,9	15,83		Flores (2015-2019)
Botuverá	Residual de xisto	CD		29,60		28,6	18,90		Flores (2015-2019)
Botuverá	Residual de argilito	CD		12,30		30,9	16,70		Flores (2015-2019)
Botuverá	Residual de granito	CD		12,50		31,3	17,67		Flores (2015-2019)
Botuverá	Residual de argilito	CD		4,60		32,4	17,36		Flores (2015-2019)
Botuverá	Residual de xisto	CD		11,10		41,5	18,93		Flores (2015-2019)
Botuverá	Residual de xisto	CD		0,80		41,5	18,93		Flores (2015-2019)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		5,20		31,0	16,50	17,97	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		2,10		36,6	16,80	18,60	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		4,50		31,2	17,00	18,31	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		7,10		28,3	15,60	18,48	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		14,10		30,9	13,20	16,66	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		9,80		26,7	13,50	16,32	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granitóide	CD		1,60		38,1	19,20	19,88	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granitóide	CD		3,20		35,2	16,80	18,61	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granitóide	CD		3,00		33,4	15,80	18,12	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granitóide	CD		18,80		27,6	19,00	19,09	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granitóide	CD		14,60		27,7	17,00	18,28	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granitóide	CD		14,90		28,9	15,20	17,54	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		17,20		26,7	17,50	18,70	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de granito	CD		10,20		30,4	16,40	18,00	Fornasa (2018)

Braço do Norte	Residual de granito	CD		15,60		28,4	16,50	17,97	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de arenito e siltito	CD		14,60		42,2	19,90	20,12	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de arenito e siltito	CD		8,60		37,9	18,50	19,58	Fornasa (2018)
Braço do Norte	Residual de arenito e siltito	CD		11,00		36,4	18,10	19,65	Fornasa (2018)
Brusque	Residual de granito	CD		8,00		30,2	16,40		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de granito	CD		5,50		31,8	15,50		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de micaxisto	CD		8,60		41,9	17,30		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de granito	CD		8,20		33,5	15,60		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de micaxisto	CD		14,00		32,6	18,70		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de micaxisto	CD		35,50		34,4	20,10		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de meta-arenito e quartzito	CD		9,50		30,0	16,90		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de meta-arenito e quartzito	CD		13,40		28,6	16,90		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de meta-arenito e quartzito	CD		12,70		29,6	17,20		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de meta-arenito e quartzito	CD		10,70		30,6	15,03		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de sericita, biotita, filito	CD		22,90		45,7	18,33		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de granito	CD		8,10		28,3	14,80		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de sericita, biotita, filito	CD		5,70		30,7	15,00		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de sericita, biotita, filito	CD		35,00		14,3	16,80		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de granito	CD		24,40		26,2	14,03		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de micaxisto	CD		9,60		34,3	16,80		Flores (2015-2019)
Brusque	Residual de xisto	CD		37,70		27,5		20,09	Waterkemper <i>et al.</i> (2017)
Brusque	Residual de xisto	CD		35,50		34,5		20,09	Waterkemper <i>et al.</i> (2017)
Brusque	Residual de xisto	CD		25,00		39,0	18,50		Vitto <i>et al.</i> (2017)
Brusque	Residual de xisto	CD		3,00		31,4	18,36		Vitto <i>et al.</i> (2017)
Brusque	Residual de xisto	CD		9,50		30,0		16,73	Fornasa <i>et al.</i> (2017)
Brusque	Residual de xisto	CD		13,40		28,6		16,91	Fornasa <i>et al.</i> (2017)
Brusque	Residual de xisto	CD		12,70		29,6		17,05	Fornasa <i>et al.</i> (2017)

Brusque	Residual de xisto	CD		10,70		30,6		16,73	Fornasa <i>et al.</i> (2017)
Camboriú	Residual de xisto	CD		10,50		26,0	19,70		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de xisto	CD		19,22		28,1	16,68		Flores (2015-2019)
Camboriú	Sedimentos quaternários	CD		3,39		35,3	18,46		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de granito	CD		35,97		20,2	17,21		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de migmatito	CD		8,60		31,8	17,30		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de granito	CD		11,10		27,5	16,60		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de granito	CD		6,10		33,8	19,10		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de xisto	CD		6,00		37,7	18,10		Flores (2015-2019)
Camboriú	Depósito de encosta	CD		5,00		33,6	18,70		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de granito	CD		9,10		25,6	18,40		Flores (2015-2019)
Camboriú	Residual de xisto	CD		0,00		17,1	15,50	19,20	Souza (2015)
Camboriú	Residual de xisto	CD		19,20		28,1	13,60	16,70	Souza (2015)
Camboriú	Residual de xisto	CD		4,80		24,5	14,00	16,80	Souza (2015)
Camboriú	Sedimentos quaternários	CD		3,40		35,3	15,10	18,50	Souza (2015)
Camboriú	Residual de granito	CD		36,00		20,2	16,10	17,20	Souza (2015)
Camboriú	Residual de gnaíse	CD		10,90		34,2	14,70	16,30	Souza (2015)
Camboriú	Residual de xisto	CD		17,00		38,2	18,56		Vitto (2016)
Camboriú	Residual de xisto	CD		17,28		38,0	18,08		Vitto (2016)
Corupá	Residual de granulito	CD		16,20		30,3			Oliveira <i>et al.</i> (2017)
Corupá	Residual de granulito	BST		16,60		34,7			DNIT (2016)
Criciúma	Residual de siltito e pelito	CD		19,20		24,4	17,50		Flores (2015-2019)
Criciúma	Residual de folhelho e siltito	CD		23,90		32,0	17,20		Flores (2015-2019)
Criciúma	Residual de arenito, siltito e pelito	CD		7,30		29,4	18,80		Flores (2015-2019)
Criciúma	Residual de diabásio	CD		40,40		39,1	18,20		Flores (2015-2019)
Criciúma	Residual de folhelho e siltito	CD		25,40		39,1	17,10		Flores (2015-2019)
Criciúma	Residual de siltito	CD		14,90		36,6	17,00		Flores (2015-2019)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		7,90		40,3	15,90		Flores (2015-2019)
Florianópolis	Residual de granito	CD		11,00		34,8	17,80		Flores (2015-2019)
Florianópolis	Residual de riolito	CD		11,20		30,3	17,30		Flores (2015-2019)

Florianópolis	Residual de granito	CD		5,10		32,2	18,40		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		13,78		29,6	16,30		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		9,60		30,8	17,60		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		10,47		37,5	18,20		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Residual de granito	CD		21,57		30,4	16,30		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Residual de granito	CD		10,29		40,8	16,50		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		33,56		29,6	19,00		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		0,16		44,3	21,20		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		0,00		33,0	14,60		Imai; Rosniecek (2013)
Florianópolis	Residual de granito	CD	92,30	16,00	27,0	32,0	18,00		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD	17,90	0,00	36,0	35,0	16,40		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD	8,90		42,0		20,10		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD	25,60		37,0		18,00		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		7,00		32,0			Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		0,00		30,0			Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		7,00		39,0			Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD					19,20		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		2,00		39,0			Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		3,20		41,0			Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD	37,10	32,50	25,0	25,0	17,60		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD	33,10	20,40	30,0	28,0	18,00		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		10,80		27,0	16,50		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		6,80		28,0	16,00		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		26,30		22,0	18,80		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		0,90		36,0	16,10		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de granito	CD		0,00		46,0	17,30		Santos (1997)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD	49,60	19,00	33,0	26,0	16,40		Santos (1997)

Florianópolis	Residual de diabásio	CD		5,00		35,0	18,00		Santos (1997)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD		9,10		34,0	18,90		Santos (1997)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD		4,00		30,0	18,10		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	0,00	0,00	29,0	28,0	17,00		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	0,00	0,00	28,0	27,0	17,70		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	0,00	0,00		27,0	14,10		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	0,00	0,00		28,0	15,30		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	0,00	0,00		29,0	14,10		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	9,40				14,70		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	5,10				12,40		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	10,80				13,80		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	15,80				15,60		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	15,60				15,90		Santos (1997)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		5,03		30,0			LAMGEO (2018)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		5,91		30,2			LAMGEO (2018)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		6,53		31,4			LAMGEO (2018)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD		7,22		32,1			LAMGEO (2018)
Florianópolis	Residual de granito	CD		10,58		34,0	18,41		Oliveira (2014)
Florianópolis	Residual de granito	CD		6,92		37,0	19,29		Oliveira (2014)
Florianópolis	Residual de granito	CD		15,10		34,0	18,60		Oliveira (2014)
Florianópolis	Residual de granito	CD		6,11		40,6	17,72		Oliveira (2014)
Florianópolis	Residual de granito	CD		3,62		38,0	17,92		Oliveira (2014)
Florianópolis	Residual de granito	CD		13,72		29,1	19,19		Oliveira (2014)
Florianópolis	Residual de granito	CD	24,00	3,00	33,2	32,0	16,98		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Residual de granito	CD	11,00	7,00	48,0	43,3	16,70		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Residual de granito	CD	20,00	14,00	37,0	34,4	15,86		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		22,00		29,4	16,76		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Residual de granito	CD	18,00	6,00	37,1	35,2	16,30		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD	22,00	0,00	39,2	40,1	17,67		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Residual de granito	CD	18,00	4,00	38,6	37,3	15,07		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Residual de granito	CD	24,00	2,00	54,6	37,3	16,27		Bevilaqua (2004)
Florianópolis	Residual de granito	CD	58,00	12,00	34,7	34,4	16,74		Bevilaqua (2004)

Florianópolis	Residual de granito	CD		3,59	35,6	18,5	15,80		Monteiro (2016)
Florianópolis	Residual de granito	CD		2,22	34,9	18,8	14,50		Monteiro (2016)
Florianópolis	Residual de granito	CD		3,76	39,3	17,5	16,30		Monteiro (2016)
Florianópolis	Residual de granito	CD	42,25	16,82	36,7	32,4	17,20		Raimundo (1998)
Florianópolis	Residual de granito	CD	17,79	5,75	40,3	35,5	17,20		Raimundo (1998)
Florianópolis	Residual de granito	CD	28,90	5,20	35,9	35,9	17,20		Raimundo (1998)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD	26,50	4,80	30,9	35,9	16,10		Raimundo (1998)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD		10,58		34,0	17,10	18,41	Bim (2015)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD		6,92		37,0	18,00	19,29	Bim (2015)
Florianópolis	Residual de granito	CD		15,10		34,0	17,71	18,60	Bim (2015)
Florianópolis	Residual de granito	CD		6,11		40,6	16,01	17,72	Bim (2015)
Florianópolis	Residual de granito	CD		3,62		38,0	16,12	17,92	Bim (2015)
Florianópolis	Residual de granito	CD		13,72		29,1	17,46	19,19	Bim (2015)
Florianópolis	Residual de granito	CD	20,95	12,14	36,0	26,0			Carreno (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD	14,18	8,46	41,0	32,0			Carreno (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD	25,00	11,66	28,0	29,0			Carreno (2017)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD	14,71	1,78	38,0	28,0			Carreno (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD	14,61	8,98	36,0	32,0			Carreno (2017)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD	23,29	11,90	36,0	33,0			Carreno (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD		7,20		32,7	16,80	18,20	Silveira (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD		7,90		34,8	17,60	18,70	Silveira (2017)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD		17,60		30,0	16,50	18,50	Silveira (2017)
Florianópolis	Depósito de encosta	CD		15,30		30,0	15,90	18,10	Silveira (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD		12,60		32,8	16,70		Pecapiedra (2016)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		9,50		35,3	14,85		Pecapiedra (2016)
Florianópolis	Residual de granito	CD		2,90		29,9		18,73	Goulart <i>et al.</i> (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD		12,50		30,0	14,50		Santos (2005)
Florianópolis	Residual de granito	CD		23,70		11,0	16,49		Deucher; Kunzel (2019)
Florianópolis	Residual de granito	CD		12,00		28,3			Nunes (2017)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		14,50		30,5			Nunes (2017)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		8,85		31,3			Campos (2015)
Florianópolis	Residual de diabásio	CD		10,65		31,5			Massocco (2017)

Florianópolis	Residual de granito	CD		20,48		29,0			Massocco (2017)
Florianópolis	Residual de granito	CD	7,39	3,80	38,2	34,4		18,17	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Residual de granito	CD	18,40	5,40	42,1	35,8		17,84	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Residual de granito	CD	51,30	18,20	54,2	28,8		18,94	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	CD	28,30	5,10	27,0	29,4		20,24	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Residual de granito	BST	21,00		31,0				Massocco (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	7,50		28,0				Massocco (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	16,00		24,0				Massocco (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	9,50		27,0				Massocco (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	20,41	12,33	33,8	31,0			Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	20,98	13,77	23,6	23,6			Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	40,00	9,00	25,6	27,5			Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	19,67	10,00	31,0	33,1			Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	23,00	8,00	27,5	27,8			Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	16,94	8,65	30,9	24,1			Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST	21,00	4,00	43,1	32,6		18,17	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Residual de granito	BST	9,00	1,00	26,6	35,6		17,84	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Residual de granito	BST	13,00	6,00	42,6	35,0		18,94	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	BST	9,00	0,00	36,3	35,6		20,24	Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Residual de diabásio	BST		5,00		28,0			LAMGEO (2016)
Florianópolis	Residual de granito	BST		17,50		29,9			Salum (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		19,00		34,2			Salum (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		9,50		35,7			Salum (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		21,00		23,2			Salum (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		19,00		28,0			Salum (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		8,79		33,9		16,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		17,19		22,0		16,30	Christ (2019)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	BST		6,69		25,7		15,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		19,78		10,9		16,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		7,64		20,0		16,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		18,08		21,2		15,80	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		7,49		44,9		16,30	Christ (2019)

Florianópolis	Sedimentos quaternários	BST		12,92		23,0		15,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		18,00		19,2		15,80	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de diabásio	BST		7,07		18,9		15,80	Christ (2019)
Florianópolis	Sedimentos quaternários	BST		4,57		28,8		15,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		2,70		23,4		16,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		7,00		27,9		15,80	Christ (2019)
Florianópolis	Depósito de encosta	BST		4,83		25,4		19,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		14,04		13,7		16,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		12,33		31,0		16,30	Christ (2019); Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST		13,77		23,6		15,80	Christ (2019); Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST		9,00		27,5		15,80	Christ (2019); Caraméz (2017)
Florianópolis	Depósito de encosta	BST		10,00		33,1		19,30	Christ (2019); Caraméz (2017)
Florianópolis	Depósito de encosta	BST		8,00		27,8		19,30	Christ (2019); Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de granito	BST		8,65		24,1		15,80	Christ (2019); Caraméz (2017)
Florianópolis	Residual de diabásio	BST		4,00		32,6		15,80	Christ (2019); Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Depósito de encosta	BST		1,00		35,6		19,30	Christ (2019); Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Depósito de encosta	BST		6,00		35,0		19,30	Christ (2019); Sakamoto <i>et al.</i> (2016)
Florianópolis	Residual de granito	BST		12,00		21,8		15,80	Christ (2019)
Florianópolis	Depósito de encosta	BST		12,80		27,9		19,30	Christ (2019)
Florianópolis	Residual de granito	BST		9,00		38,9	17,30	19,00	Silva (2019)
Florianópolis	Depósito de encosta	BST		7,00		29,3	18,70	19,10	Rigotti (2019)
Florianópolis	Residual de riolito*	CD		0,00		25,4	17,00		Lehmkuhl; Abreu (2021)
Gaspar	Residual de arenito	CD		11,46		28,4	19,22		Flores (2015-2019)
Gaspar	Depósito de encosta	CD		9,31		33,5	17,62		Flores (2015-2019)
Gaspar	Residual de siltito	CD		10,64		34,7	19,78		Flores (2015-2019)
Gaspar	Residual de milonito	CD		11,42		24,0	15,71		Flores (2015-2019)
Gaspar	Residual de filito	CD		23,58		15,9	14,09		Flores (2015-2019)

Gaspar	Residual de granito	CD		2,68		22,9	14,80		Flores (2015-2019)
Gaspar	Residual de granulito	CD		10,70		24,7	16,63		Heidemann (2011)
Gaspar	Residual de granulito	Triaxial		12,50		32,3	16,63		Heidemann (2011)
Gov. Celso Ramos	Residual de granito	CD		16,00		28,7	14,00		Flores (2015-2019)
Ibirama	Residual de gnaisse*	BST		1,70		22,5	15,50		Schwarz (2016)
Ibirama	Residual de argilito*	BST		2,00		14,8	16,10		Schwarz (2016)
Ibirama	Residual de gnaisse*	BST		1,50		26,3	17,82		Schwarz (2016)
Ibirama	Residual de argilito*	BST		1,50		18,0	15,82		Schwarz (2016)
Ibirama	Residual de argilito*	BST		4,67		12,7	17,95		Schwarz (2016)
Ibirama	Residual de gnaisse*	BST		1,60		18,8	18,12		Schwarz (2016)
Ilhota	Residual de milonito	CD		10,26		24,2	18,33		Flores (2015-2019)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD		23,92		20,7	15,71		Flores (2015-2019)
Ilhota	Residual de arenito	CD		8,42		26,5	17,40	19,00	Sbroglia (2015)
Ilhota	Residual de conglomerado	CD		5,24		29,2	16,80	18,01	Sbroglia (2015)
Ilhota	Residual de folhelho	CD		2,94		25,3	16,80	18,39	Sbroglia (2015)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD		6,95		31,8	17,30	19,52	Sbroglia (2015)
Ilhota	Residual de piroxenito	CD		12,96		15,8	14,60	16,67	Sbroglia (2015)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD		27,00		28,0			Dias <i>et al.</i> (2015)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD	40,96	21,28	35,9	38,9	18,90	20,18	Dias <i>et al.</i> (2015)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD	40,38	21,46	19,7	26,3	17,08	17,95	Dias <i>et al.</i> (2015)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD	27,65	18,51	31,7	35,7	19,12	20,35	Parizoto (2014)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD	46,20	28,70	28,4	27,0	17,00	18,22	Parizoto (2014)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD	54,75	27,00	24,6	24,5	16,30	17,97	Parizoto (2014)
Ilhota	Residual de folhelho	CD		13,40		27,2	14,50		Flach (2020)
Ilhota	Residual de arenito	CD		16,50		24,8	15,60		Flach (2020)
Ilhota	Residual de gnaisse	CD		12,30		29,3	10,70		Flach (2020)
Ilhota	Residual de piroxênio	CD		7,00		31,1	14,50		Flach (2020)
Ilhota	Residual de folhelho	BST		6,20		27,1	15,40		Flach (2020)
Ilhota	Residual de arenito	BST		9,80		25,3	16,60		Flach (2020)
Ilhota	Residual de gnaisse	BST		2,30		30,1	11,10		Flach (2020)
Ilhota	Residual de piroxênio	BST		8,00		28,8	13,70		Flach (2020)
Indaial	Residual de siltito	CD	80,91	44,16	23,7	26,8	16,29	17,82	Dias <i>et al.</i> (2015)

Itajaí	Residual de granito	CD		6,90		40,9	19,93		Flores (2015-2019)
Itajaí	Residual de xisto	CD		7,90		30,9	17,23		Flores (2015-2019)
Itajaí	Residual de xisto	CD		18,90		28,1	18,63		Flores (2015-2019)
Itapema	Residual de granito	CD		29,50		32,4	19,50		Flores (2015-2019)
Itapema	Residual de migmatito	CD		23,20		21,7	17,20		Flores (2015-2019)
Itapema	Residual de xisto	CD		24,50		29,0	18,60		Flores (2015-2019)
Itapema	Residual de granito	CD		33,90		24,0	15,00		Flores (2015-2019)
Ituporanga	Depósito de encosta	CD		1,20		31,5	18,40		Flores (2015-2019)
Ituporanga	Residual de arenito	CD		9,43		33,3	17,80		Flores (2015-2019)
Ituporanga	Residual de arenito e pelito	CD		5,00		28,8	16,80	17,80	Flores (2015-2019)
Ituporanga	Residual de arenito e pelito	CD		5,70		26,3	16,00	17,00	Flores (2015-2019)
Ituporanga	Residual de folhelho	CD		16,00		19,8	17,00	18,00	Flores (2015-2019)
Ituporanga	Depósito de encosta	CD		0,00		36,3	18,40		Flores (2015-2019)
Ituporanga	Residual de arenito	CD		9,43		33,3	17,80	18,90	Flores (2015-2019)
Jaraguá do Sul	Residual de gnaisse	CD		14,07		37,8			LAMGEO (2018)
Jaraguá do Sul	Residual de gnaisse	CD		16,50		28,8			LAMGEO (2018)
Jaraguá do Sul	Residual de gnaisse	CD		20,00		27,0			LAMGEO (2018)
Joaçaba	Residual de basalto	BST		3,26		22,2			Luvizão <i>et al.</i> (2020)
Joaçaba	Residual de basalto	BST		5,53		17,5			Luvizão <i>et al.</i> (2020)
Joaçaba	Residual de basalto	BST		0,00		26,5			Luvizão <i>et al.</i> (2020)
Joaçaba	Residual de basalto	BST		0,71		26,5			Luvizão <i>et al.</i> (2020)
Joaçaba	Residual de basalto	BST		1,00		25,4			Luvizão <i>et al.</i> (2020)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		5,85		29,0			LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		7,04		24,5			LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		11,70		29,2			LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		6,50		29,9			LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		7,30		29,6			LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		7,45		28,8			LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		11,00		29,9			LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		17,50		35,0	18,30		LAMGEO (2018)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		11,50		35,5	18,08		Senes (2018)

Joinville	Residual de gnaisse	CD		1,38		28,4	17,52	18,19	Demartino (2016)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		2,23		28,1	17,30	18,06	Demartino (2016)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		0,10		27,4	12,76	14,87	Demartino (2016)
Joinville	Residual de gnaisse	CD		11,50		30,0	19,06		Oliveira (2019)
Joinville	Residual de gnaisse	BST		6,84			15,25	17,40	Zimmermann (2019)
Joinville	Residual de gnaisse	BST		6,28		26,9	15,25	17,40	Zimmermann (2019)
Joinville	Residual de gnaisse	BST		9,61		29,8	14,85	17,15	Zimmermann (2019)
Joinville	Residual de gnaisse	BST		8,14			14,85	17,15	Zimmermann (2019)
Joinville	Residual de gnaisse	BST		8,80		30,0	17,83	18,85	Zimmermann (2019)
Joinville	Residual de gnaisse	BST		5,75			17,83	18,85	Zimmermann (2019)
Joinville	Sedimentos quaternários	BST		0,64		32,4	17,26	18,49	Zimmermann (2019)
Joinville	Sedimentos quaternários	BST		11,77		28,4	14,61	16,87	Zimmermann (2019)
Joinville	Residual de gnaisse*	CD		13,00		26,0	18,70	19,10	Paul (2021)
Joinville	Residual de gnaisse*	CD		4,20		26,0	18,00	19,00	Paul (2021)
José Boiteux	Residual de folhelho e siltito	CD		8,40		28,2	19,60		Flores (2015-2019)
José Boiteux	Residual de arenito e pelito	CD		6,10		28,8	16,60	18,40	Flores (2015-2019)
José Boiteux	Depósito de encosta	CD		14,00		40,6	18,30	19,60	Flores (2015-2019)
José Boiteux	Residual de argilito	CD		18,20		29,8	16,90	17,80	Flores (2015-2019)
Lages	Residual de sienito	CD		12,60		23,2			Brito (2021)
Lages	Residual de sienito	CD		14,40		27,3			Brito (2021)
Lages	Residual de sienito	CD		10,60		26,1			Brito (2021)
Luiz Alves	Residual de gnaisse	CD		13,94		21,9	15,33		Flores (2015-2019)
Luiz Alves	Residual de gnaisse	CD	57,93	16,98	30,5	19,7	15,02	17,07	Santos (2012)
Luiz Alves	Residual de gnaisse	CD	85,91	31,10	34,9	28,9	17,18	18,36	Dias <i>et al.</i> (2015)
Navegantes	Residual de pelito	CD		13,10		27,5	20,00		Flores (2015-2019)
Navegantes	Residual de gnaisse	CD		7,40		36,0	17,20		Flores (2015-2019)
Navegantes	Depósito de encosta	CD		5,20		32,8	19,70		Flores (2015-2019)
Navegantes	Residual de xisto	CD		10,00		35,7	16,70		Flores (2015-2019)
Nova Trento	Residual de guanito	CD		22,09		31,3	15,69		Flores (2015-2019)
Nova Trento	Residual de guanito	CD		12,00		33,1	18,34		Flores (2015-2019)
Nova Trento	Residual de xisto	CD		22,63		35,8	17,06		Flores (2015-2019)

Nova Trento	Residual de Xisto	CD		10,80		34,4	15,30		Flores (2015-2019)
Nova Trento	Residual de granito	CD		11,30		39,2	13,94		Flach (2016)
Nova Trento	Residual de granito	CD		11,60		30,8	12,50		Flach (2016)
Nova Trento	Residual de granito	CD		8,60		36,9	12,10		Flach (2016)
Nova Trento	Residual de granito	CD		4,60		32,6	12,15		Flach (2016)
Nova Trento	Residual de granito	CD		4,50		28,6	11,33		Flach (2016)
Nova Veneza	Residual de diabásio	CD		11,20		34,9	17,30		Flores (2015-2019)
Nova Veneza	Residual de siltito e folhelho	CD		21,00		24,7	13,40		Flores (2015-2019)
Nova Veneza	Residual de arenito e folhelho	CD		11,00		28,5	17,30		Flores (2015-2019)
Nova Veneza	Residual de siltito e folhelho	CD		15,80		31,2	16,80		Flores (2015-2019)
Nova Veneza	Residual de siltito e folhelho	CD		5,50		30,1	16,60		Flores (2015-2019)
Nova Veneza	Residual de diabásio	CD		6,90		33,9	13,40		Flores (2015-2019)
Palhoça	Residual de diabásio	CD		57,00		19,2	16,00		Flores (2015-2019)
Palhoça	Residual de granito	CD		39,20		21,7	15,02		Flores (2015-2019)
Palhoça	Residual de riolito	CD		49,50		17,9	19,10		Flores (2015-2019)
Palhoça	Residual de gnaiss	CD		13,42		28,4	16,86		Flores (2015-2019)
Palhoça	Residual de gnaiss	CD		15,30		18,1	13,89		Flores (2015-2019)
Presidente Getúlio	Residual de arenito	CD		25,90		45,4	19,50		Flores (2015-2019)
Presidente Getúlio	Residual de folhelho	CD		12,90		28,0	16,20		Flores (2015-2019)
Presidente Getúlio	Residual de folhelho	CD		7,60		32,1	18,10		Flores (2015-2019)
Presidente Getúlio	Residual de arenito	CD		23,30		27,7	18,30	18,60	Flores (2015-2019)
Presidente Getúlio	Residual de folhelho e siltito	CD		10,60		34,5	20,40	21,30	Flores (2015-2019)
Presidente Getúlio	Residual de arenito	CD		5,60		37,6	19,10	19,80	Flores (2015-2019)
Rio do Sul	Depósito de encosta	CD		10,50		29,0		22,55	Noveletto (2017)
Rio do Sul	Depósito de encosta	CD		0,00		54,7		22,38	Noveletto (2017)
Rio do Sul	Depósito de encosta	CD		37,50		36,6		16,95	Noveletto (2017)
Rio do Sul	Residual de folhelho e siltito*	BST	3,30	10,67	43,1	19,3	21,21		Paul (2017)
Rio do Sul	Residual de arenito e siltito*	BST	4,00	2,20	32,0	27,9	21,05		Paul (2017)

Rio do Sul	Residual de arenito e siltito*	BST	1,00	1,40	36,9	33,4	20,37		Paul (2017)
Rio do Sul	Sedimentos quaternários*	BST	6,60	3,60	42,6	28,4	21,00		Paul (2017)
Rio dos Cedros	Residual de argilito	CD	26,00	10,00	27,9				Grandro (2011)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		15,20		29,1	16,91		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		8,60		34,2	13,97		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		4,70		30,3	14,74		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		10,70		29,6	17,08		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		14,00		33,4	16,53		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		10,10		33,8	15,01		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		11,10		30,0	16,43		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		12,20		27,2	16,32		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		14,50		32,8	17,13		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD		17,60		31,7	17,54		Reginatto (2013)
Rio dos Cedros	Residual de gnaise	CD	64,73	24,23	24,0	29,3	18,03	19,22	Dias <i>et al.</i> (2015)
Rio Fortuna	Residual de granito	CD		2,30		34,5	19,02		Flores (2015-2019)
Rio Fortuna	Depósito de encosta	CD		12,50		41,0	19,22		Flores (2015-2019)
Rio Fortuna	Residual de diabásio	CD		9,10		33,5	16,28		Flores (2015-2019)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	20,00	14,00	20,7				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	25,00	12,00	24,0				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	28,00	9,00	26,2				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	25,00	13,00	21,6				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	15,00	5,00	26,8				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	29,00	15,00	20,1				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	21,00	11,00	25,8				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	21,00	13,00	25,9				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	26,00	14,00	23,3				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	19,00	5,00	26,3				Grandro (2011)
Rio Negrinho	Residual de argilito*	CD	19,00	8,00	25,4				Grandro (2011)
Rodeio	Residual de gnaise	CD		0,50		33,0	17,45		Flores (2015-2019)
Rodeio	Residual de gabro	CD		22,10		29,5	15,96		Flores (2015-2019)
Rodeio	Residual de gnaise	CD		0,90		37,8	18,49		Flores (2015-2019)

Rodeio	Residual de gnaïsse	CD		5,60		31,5	17,00	18,10	Flores (2015-2019)
Rodeio	Residual de gabro	CD		64,00		25,6	18,60	19,00	Flores (2015-2019)
Rodeio	Residual de gnaïsse	CD		2,40		33,3	15,50	18,30	Flores (2015-2019)
Rodeio	Depósito de encosta	CD		9,20		33,0	17,10	18,20	Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de xisto	CD		15,60		29,1	18,50		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de riolito	CD		0,70		26,8	15,50		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD		3,38		30,9	14,60		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Depósito de encosta	CD		7,92		30,5	15,30		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD		10,27		29,8	16,70		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de anfibólio	CD		8,45		29,9	14,80		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de anfibólio	CD		4,91		30,4	17,20		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD		1,57		33,4	15,70		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD		9,37		33,2	16,20		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD		9,61		30,9	16,00		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD		11,00		36,4	18,90		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de anfibólio	CD		14,31		26,6	16,70		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de folhelho	CD		12,57		26,2	17,30		Flores (2015-2019)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD	21,60	15,90	41,5	30,9			Meirelles; Dias (2004)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD	22,70	4,16	41,3	30,4			Meirelles; Dias (2004)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de granito	CD	46,90	6,00	30,9	35,4			Meirelles; Dias (2004)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de gnaïsse	CD	27,30	11,60	34,3	35,1	16,01		Silva (2015)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de gnaïsse	CD	25,90	10,40	34,4	32,8	15,46		Silva (2015)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de gnaïsse	CD	14,50	13,00	41,5	37,9	17,71		Silva (2015)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de gnaïsse	CD	14,40	4,20	39,5	39,2	17,46		Silva (2015)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de gnaïsse	CD	17,10	17,10	42,1	36,7	17,50		Silva (2015)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		3,38		30,9	14,60	26,30	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		7,92		30,5	15,30	26,30	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		10,27		29,8	16,70	26,50	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		8,45		29,9	14,80	25,90	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		4,91		30,4	17,20	26,10	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Granito	CD		4,50		32,4	15,70	26,10	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Granito	CD		9,37		33,2	16,20	26,70	Correia (2018)

Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		9,61		30,9	16,00	26,40	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		11,00		36,4	18,90	26,30	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Anfibolito	CD		14,31		26,6	16,70	26,60	Correia (2018)
Santo Amaro Imperatriz	Residual de Filito	CD		12,57		26,2	17,30	26,00	Correia (2018)
São Bento do Sul	Residual de riolito	CD		8,00		29,0			DNIT (2016)
São Bento do Sul	Residual de arenito	CD		17,21		24,8			DNIT (2016)
São Bento do Sul	residual de riolito	BST		8,00		37,4			DNIT (2016)
São José	Residual de granito	CD		15,80		29,7	16,10		Flores (2015-2019)
São José	Residual de tonalito	CD		8,20		28,7	16,80		Flores (2015-2019)
São José	Depósito de encosta	CD		13,43		30,2	15,40		Flores (2015-2019)
São José	Residual de granito	CD		17,94		19,4	14,60		Flores (2015-2019)
São José	Residual de granito	CD		15,90		24,3	16,30		Flores (2015-2019)
São José	Residual gnaisse e migmatito	CD		3,22		30,1	16,10		Flores (2015-2019)
São José	Residual gnaisse e migmatito	CD		16,84		19,3	16,50		Flores (2015-2019)
São José	Residual gnaisse e migmatito	CD		9,70		29,0	16,60		Flores (2015-2019)
São José	Depósito de encosta	CD		17,09		31,5	17,40		Flores (2015-2019)
São José	Residual gnaisse e migmatito	CD		13,16		24,2	16,60		Flores (2015-2019)
São José	Residual de granito	CD		10,90		21,6	16,30		Flores (2015-2019)
São José	Residual de gnaisse e migmatito	CD		13,40		30,2	15,11	17,74	Rosolem (2014)
São José	Residual de granito	CD		18,90		19,4	14,32	16,72	Rosolem (2014)
São José	Residual de granito	CD		15,90		26,3	15,99	17,42	Rosolem (2014)
São José	Residual de gnaisse e migmatito	CD		3,20		30,8	15,79	19,26	Rosolem (2014)
São José	Residual de gnaisse e migmatito	CD		14,60		19,3	16,19	18,64	Rosolem (2014)
São José	Residual de gnaisse e migmatito	CD		9,90		36,2	16,28	18,18	Rosolem (2014)
São José	Depósito de encosta	CD		17,10		31,4	17,07	18,32	Rosolem (2014)
São José	Residual de gnaisse e migmatito	CD		13,20		25,0	16,28	17,85	Rosolem (2014)
São José	Residual de gnaisse e migmatito	CD		10,90		25,8	15,99	17,17	Rosolem (2014)

São José	Residual de granito	CD		13,50		30,5	16,84		Heidemann (2015)
São José	Residual de granito	CD		8,70		31,8	16,17		Heidemann (2015)
São José	Residual de granito	CD		20,40		26,4	16,98		Heidemann (2015)
São José	Residual de granito	CD		18,00		28,0	15,65		Heidemann (2015)
São José	Residual de migmatito	CD		40,50		26,1	17,80	18,50	Conte <i>et al.</i> (2017)
São José	Residual de migmatito	CD		32,20		28,3	18,40	19,40	Conte <i>et al.</i> (2017)
São José	Residual de granito	CD		18,34		29,8	18,87		Rovani; Machado (2018)
São José	Residual de granito	CD		17,52		25,8	19,63		Rovani; Machado (2018)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		16,06		39,4	17,20		Boehl (2011)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		4,48		37,7	16,57		Boehl (2011)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		5,34		32,2	16,17		Boehl (2011)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		34,35		27,5	17,70		Boehl (2011)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		4,38		35,8	16,37		Boehl (2011)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		13,48		29,7	15,47		Boehl (2011)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		14,03		27,4	16,33		Boehl (2011)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		10,00		30,0			Oliveira (2006)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		4,50		35,0			Oliveira (2006)
São Pedro de Alcantara	Residual de granito	CD		0,00		32,0			Oliveira (2006)
Taió	Residual de pelito, arenito e siltito	CD		12,50		38,7	17,60		Flores (2015-2019)
Taió	Residual de pelito, arenito e siltito	CD		13,40		30,4	18,20		Flores (2015-2019)
Taió	Residual de argilito	CD		35,20		27,6	17,20		Flores (2015-2019)
Taió	Residual de pelito, arenito e siltito	CD		46,10		18,7	18,07		Flores (2015-2019)
Taió	Residual de arenito	CD		20,70		29,1	16,93		Flores (2015-2019)
Taió	Residual de arenito	CD		14,40		30,4	16,50		Flores (2015-2019)
Taió	Residual de arenito	CD		14,10		24,3	15,67		Flores (2015-2019)
Taió	Residual de arenito	CD		31,70		46,0	17,20		Flores (2015-2019)
Taió	Depósito de encosta	CD		14,70		26,6	18,70		Flores (2015-2019)
Taió	Sedimentos quaternários	CD		6,60		23,0	15,30		LAMGEO (2018)
Taió	Sedimentos quaternários	CD		7,60		26,0	16,10		LAMGEO (2018)

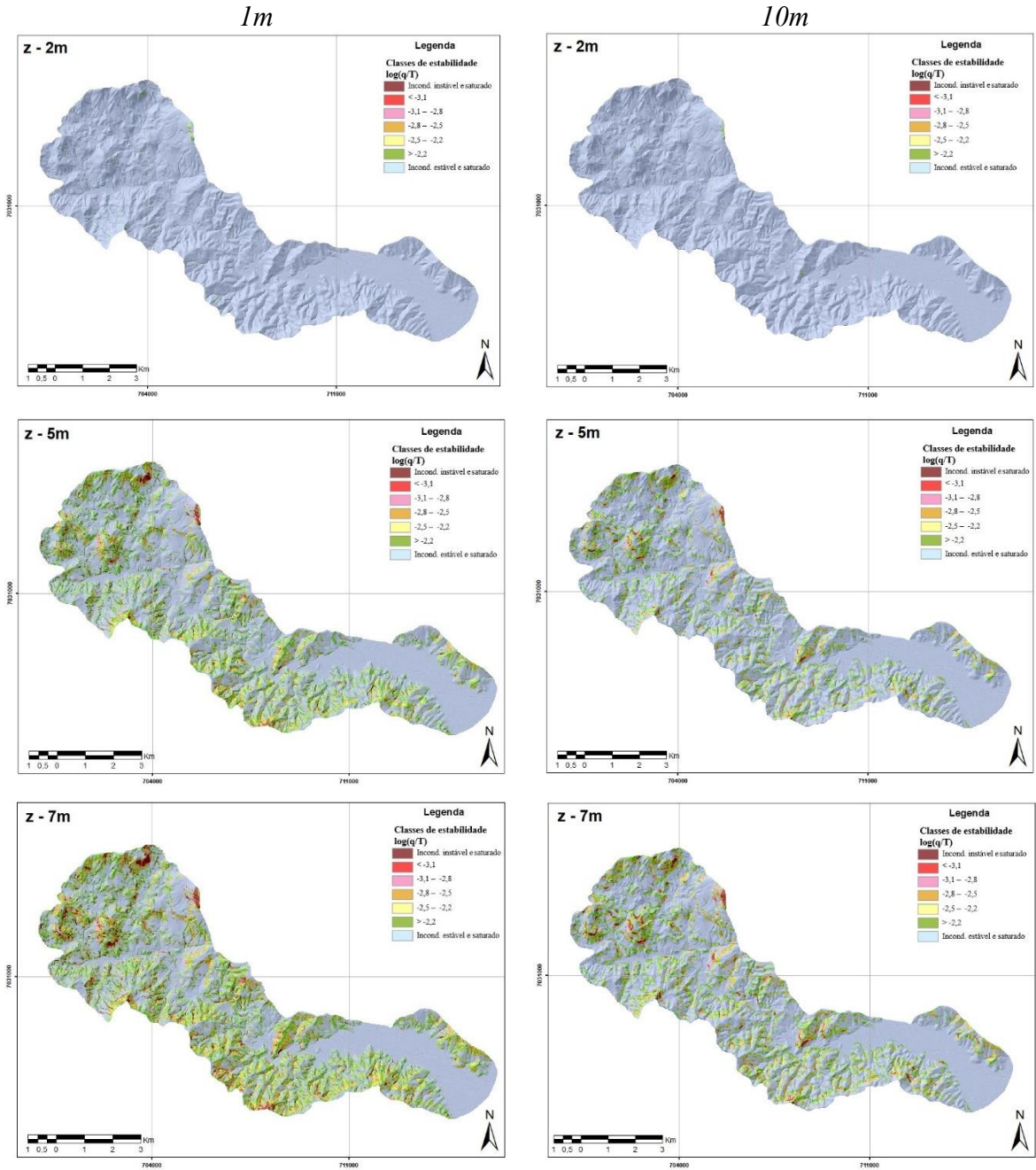
Taió	Sedimentos quaternários	CD		3,30		27,8	14,10		LAMGEO (2018)
Taió	Depósito de encosta	CD		8,90		23,9	16,40		LAMGEO (2018)
Taió	Sedimentos quaternários	CD		4,90		25,5	14,70		LAMGEO (2018)
Taió	Residual de pelito, arenito, siltito	CD		2,00		27,1	15,80		LAMGEO (2018)
Taió	Sedimentos quaternários	CD		6,00		24,7	13,90		LAMGEO (2018)
Taió	Sedimentos quaternários	CD		7,40		25,3	15,50		LAMGEO (2018)
Taió	Sedimentos quaternários	CD		5,40		27,0	16,10		LAMGEO (2018)
Tijucas	Residual de granito	CD		8,80		30,9	16,00		Flores (2015-2019)
Tijucas	Residual de granito	CD		3,50		30,1	15,00		Flores (2015-2019)
Tijucas	Residual de anfibólio	CD		11,00		25,3	16,25		Flores (2015-2019)
Tijucas	Residual de xisto	CD		23,00		20,4	16,27		Flores (2015-2019)
Tijucas	Residual de anfibólio	CD		5,90		30,4	16,00		Flores (2015-2019)
Timbó	Residual de gabro	CD		5,40		32,6	15,90		Flores (2015-2019)
Timbó	Residual de gnaisse	CD		23,30		32,4	17,80		Flores (2015-2019)
Timbó	Depósito de encosta	CD		2,20		32,2	17,60		Flores (2015-2019)
Timbó	Residual de granito e migmatito	CD		13,50		29,7	16,53		Nau (2018)
Timbó	Residual de gnaisse	CD		10,20		35,2	19,33		Nau (2018)
Timbó	Residual de granito e migmatito	CD		16,80		31,9	17,33		Nau (2018)
Timbó	Residual de gnaisse	CD		4,30		33,1	16,06		Nau (2018)
Timbó	Residual de gabro	CD		21,10		24,8	16,93		Nau (2018)
Timbó	Residual de gnaisse	CD		10,70		29,2	15,93		Nau (2018)
Timbó	Depósito de encosta	CD		2,70		31,8	15,46		Nau (2018)
Timbó	Depósito de encosta	CD		12,40		29,2	16,43		Nau (2018)
Timbó	Residual de gabro	CD		22,00		26,1	16,43		Nau (2018)
Timbó	Residual de gnaisse	CD		4,90		27,0	15,40		Nau (2018)
Timbó	Depósito de encosta	CD		20,40		24,9	16,30		Nau (2018)
Timbó	Residual de gabro	CD		5,40		32,6	15,90		Nau (2018)
Timbó	Residual de gnaisse	CD		36,00		24,5	17,80		Nau (2018)
Tubarão	Residual de arenito	CD		20,40		29,8	19,70		Flores (2015-2019)
Tubarão	Residual de granito	CD		0,00		35,8	16,90		Flores (2015-2019)

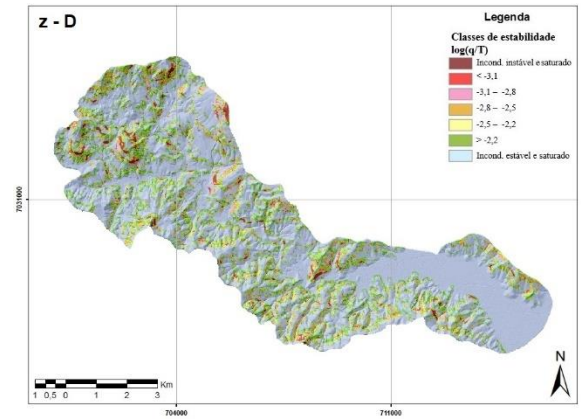
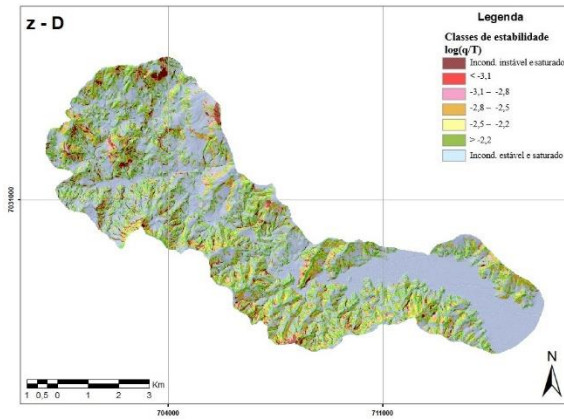
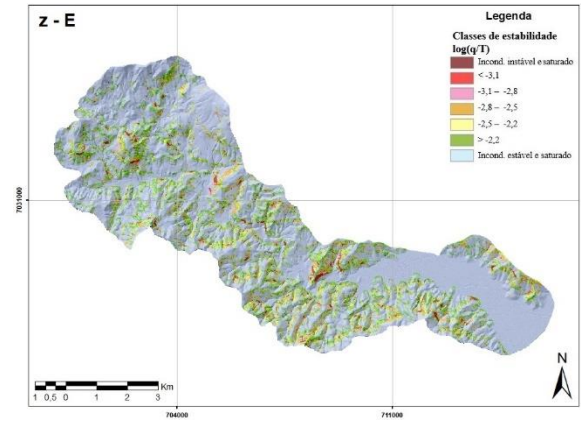
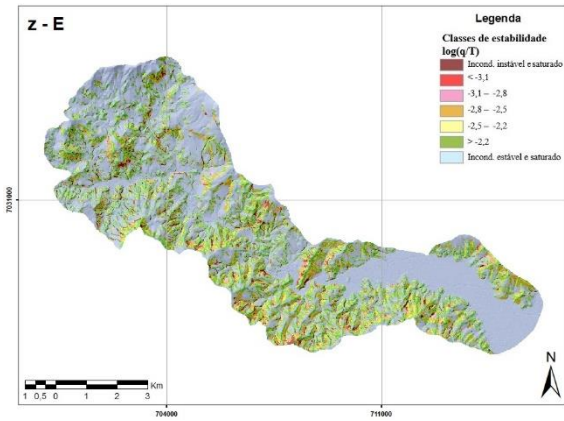
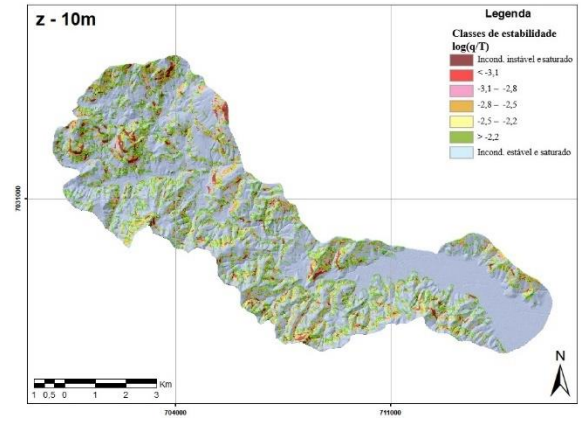
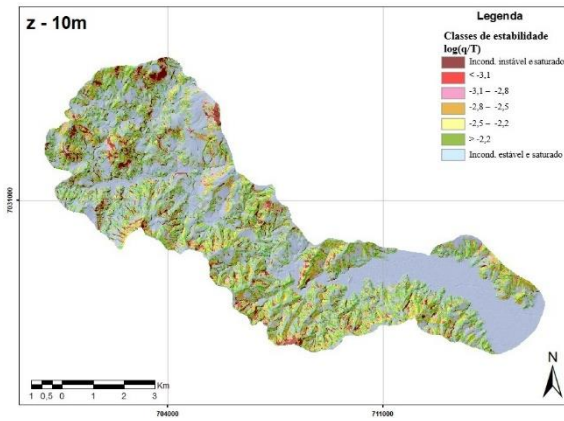
Tubarão	Residual de diorito	CD		22,60		28,4	19,50		Flores (2015-2019)
Tubarão	Residual de granito	CD		4,50		33,0	15,00		Flores (2015-2019)
Tubarão	Residual de granito	CD	15,30	11,00	36,2	31,4	17,30		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	33,43	3,58	44,5	32,1	17,10		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	104,13	13,40	46,1	35,1	14,79		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	36,15	12,99	36,6	38,7	19,32		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	55,18	0,00	32,6	41,3	16,61		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	8,62	1,36	31,9	31,5	15,64		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	37,31	11,84	24,3	23,2	15,22		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	17,24	10,95	42,9	31,6	15,20		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de granito	CD	39,90	7,30	38,9	33,7	16,77		Higashi (2006)
Tubarão	Residual de arenito	CD		20,40		29,8	20,14		Rosa (2020)
Tubarão	Residual de granito	CD		0,00		35,8	15,42		Rosa (2020)
Tubarão	Residual de diorito	CD		22,60		28,4	19,32		Rosa (2020)
Tubarão	Residual de granito	CD		4,50		33,0	15,00		Rosa (2020)

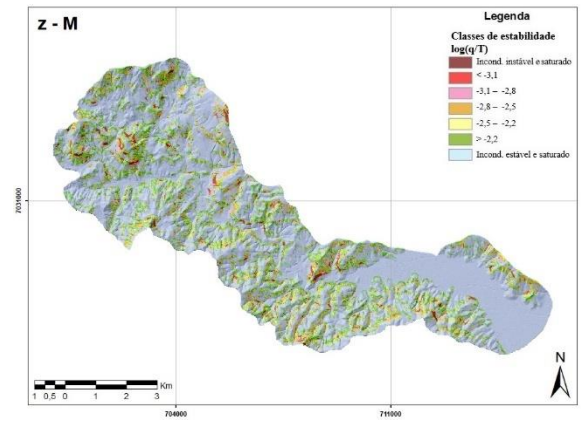
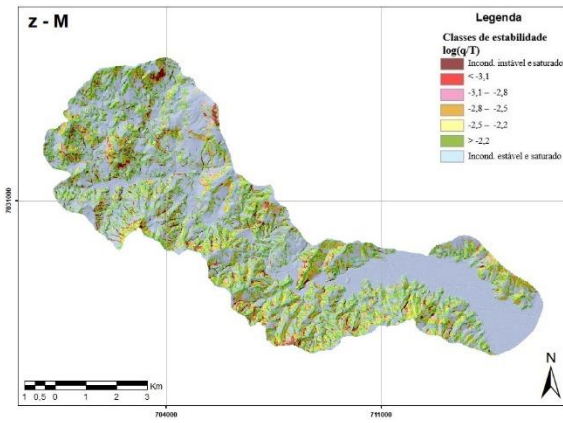
NI - Não informado; ‘ – dados estimados a partir do mapa de localização dos pontos; * - dados obtidos a partir do mapa geológico, em escala 1:100.000, do Projeto GERCO (KAUL; FERNANDES; SANTOS NETO, 2002).

APÊNDICE B – Cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para os diferentes cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos (resolução espacial 1 e 10m).

CENÁRIO A



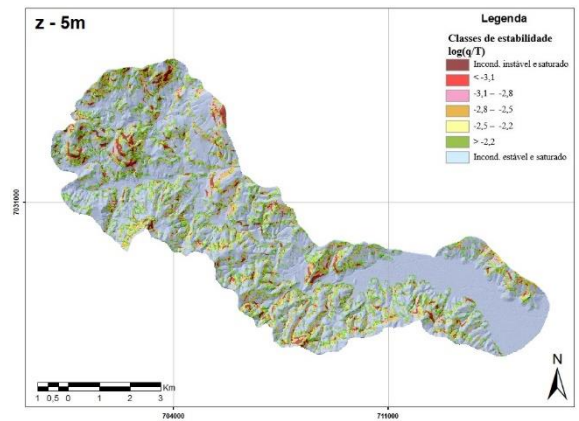
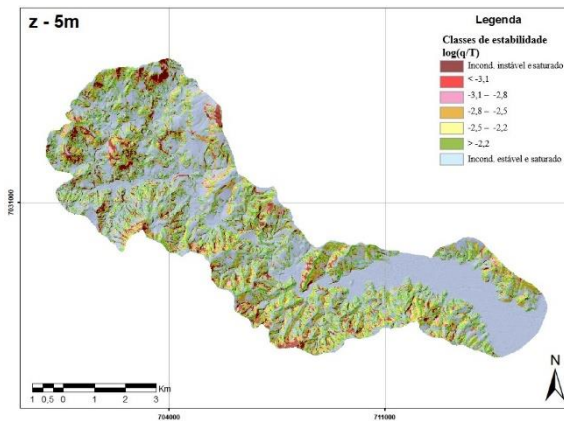
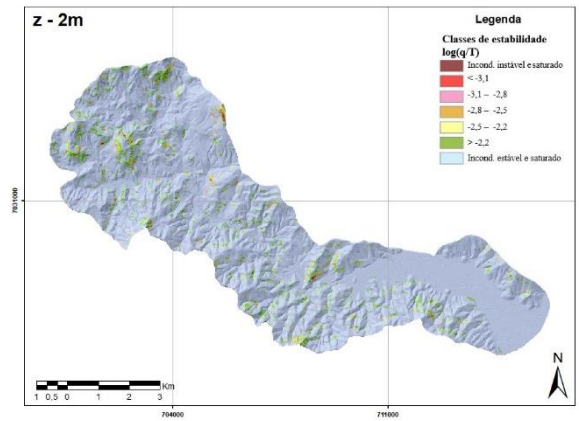
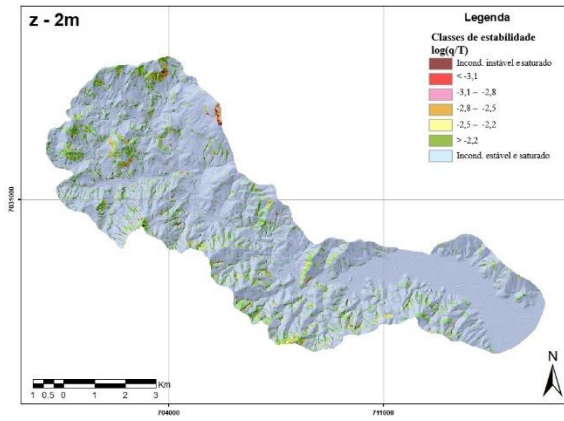


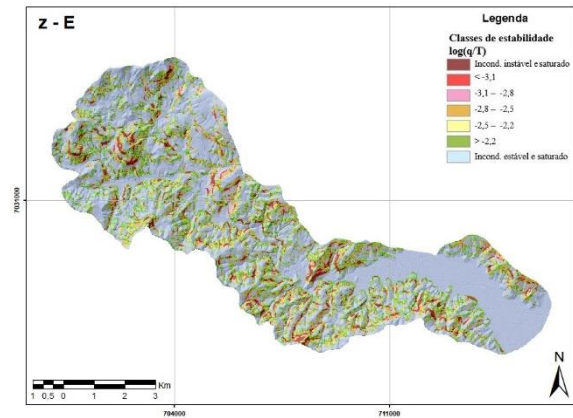
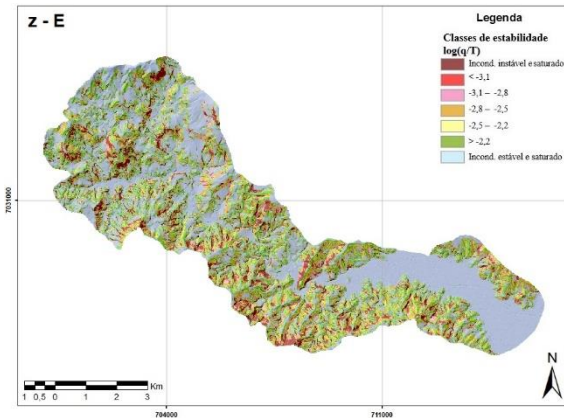
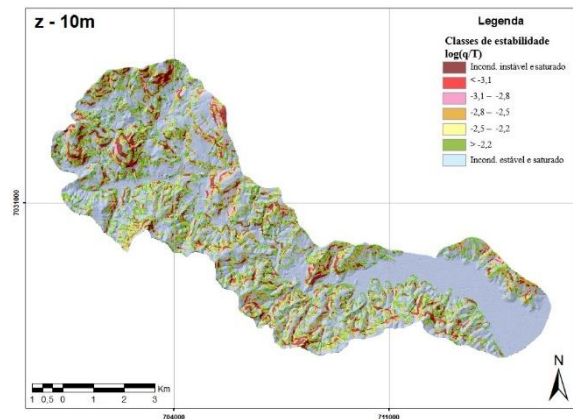
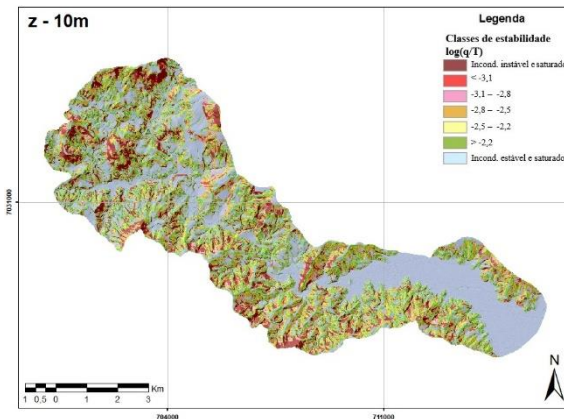
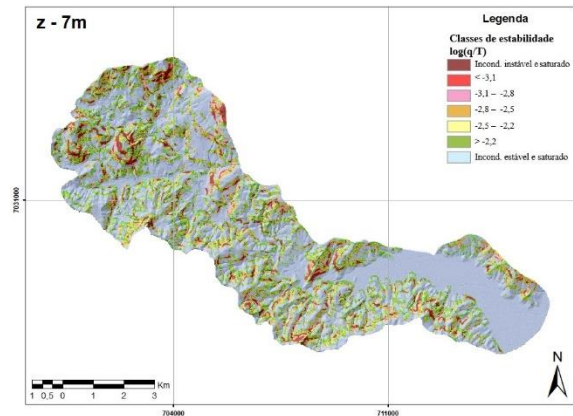
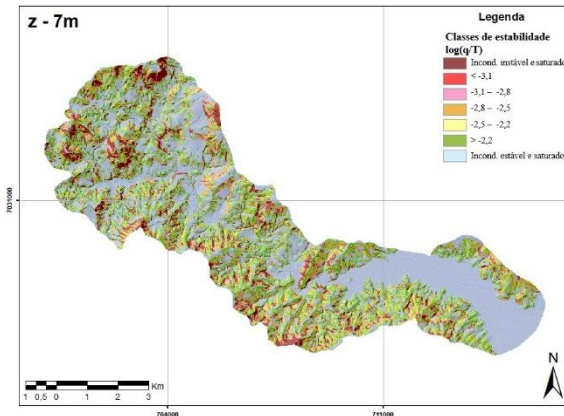


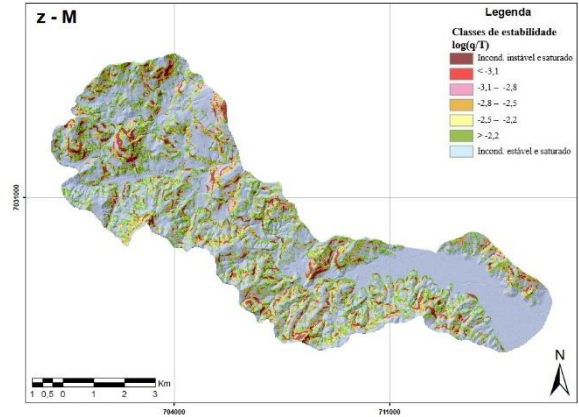
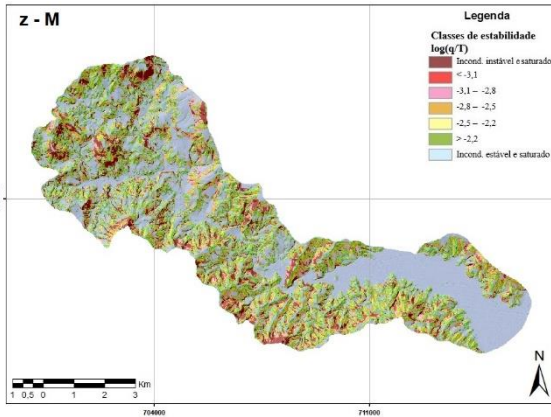
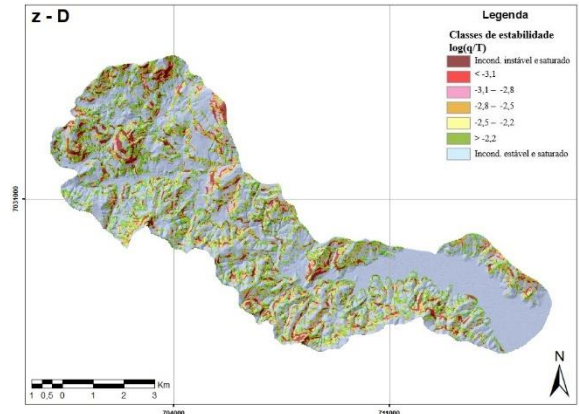
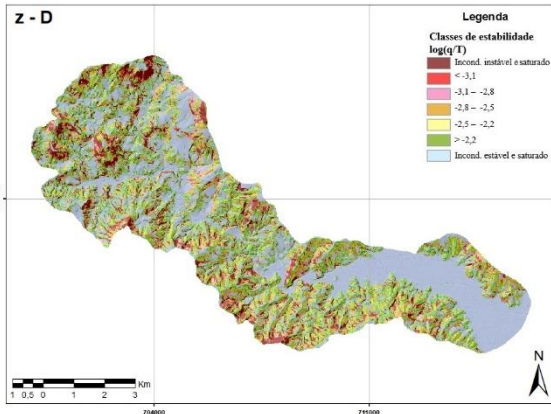
CENÁRIO B

1m

10m



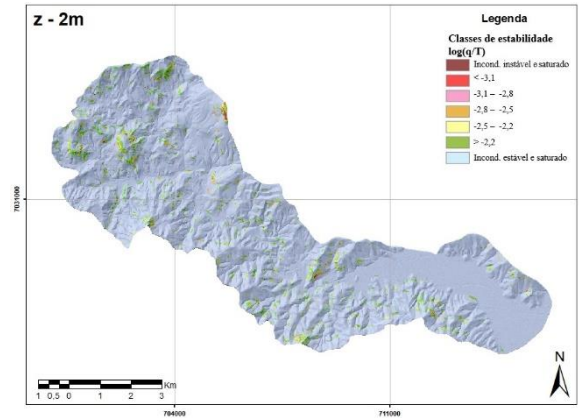
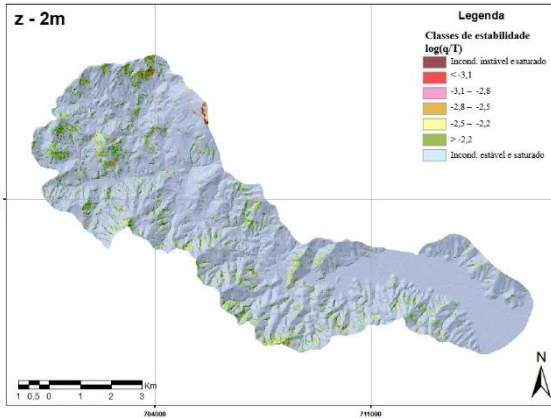


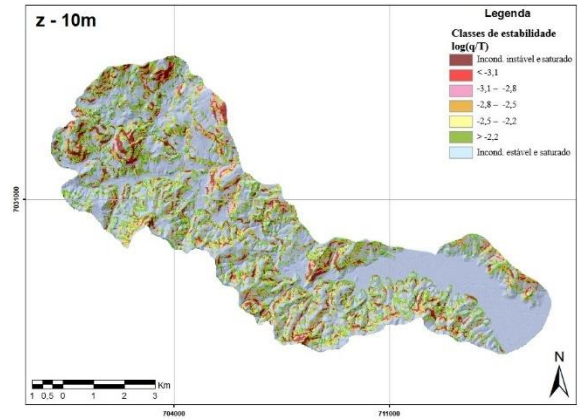
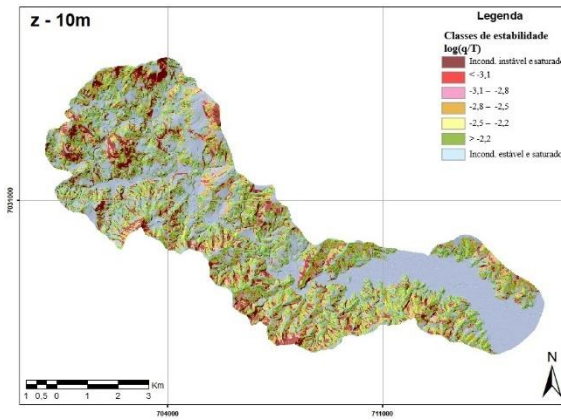
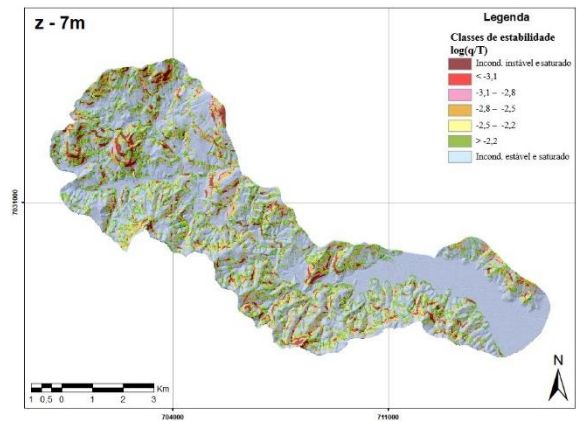
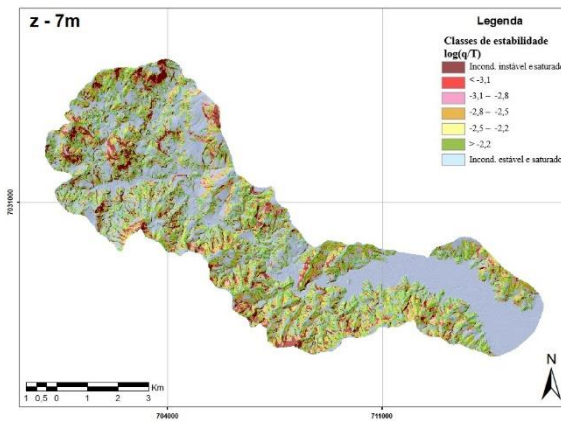
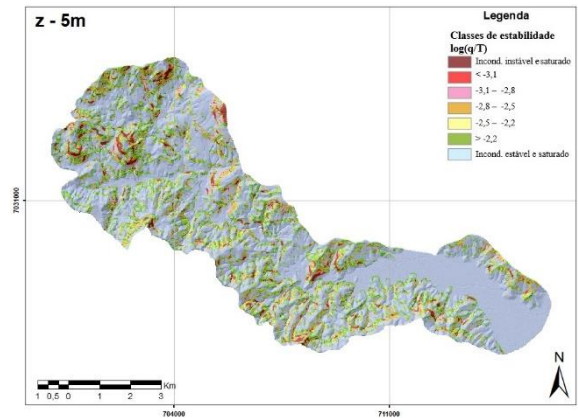
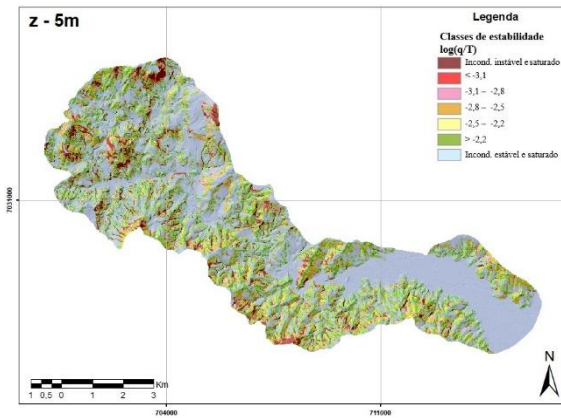


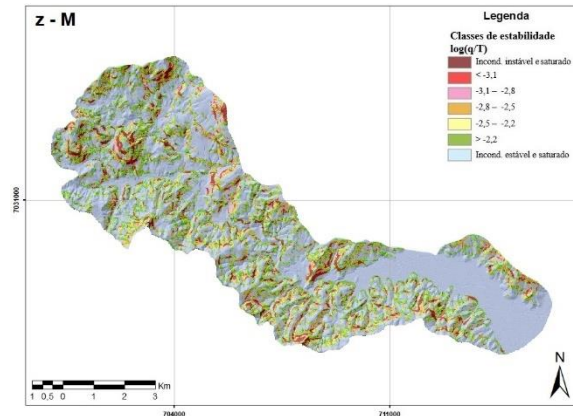
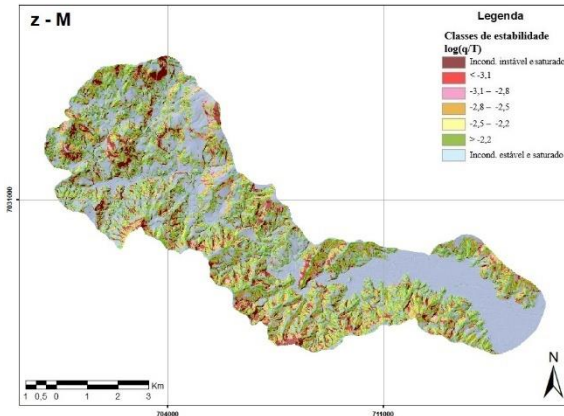
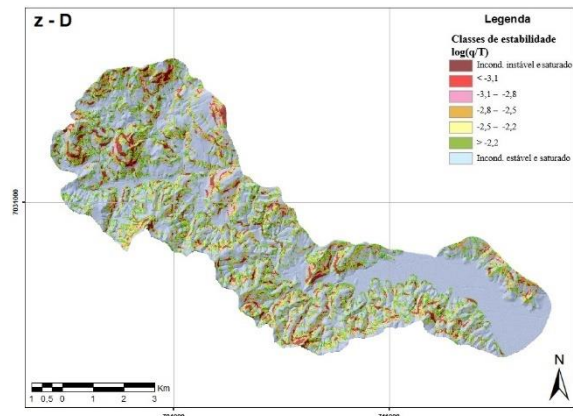
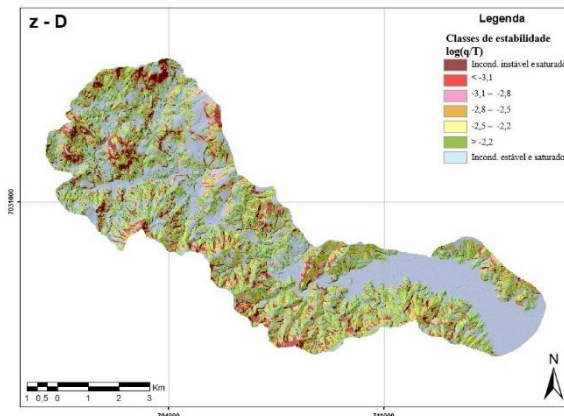
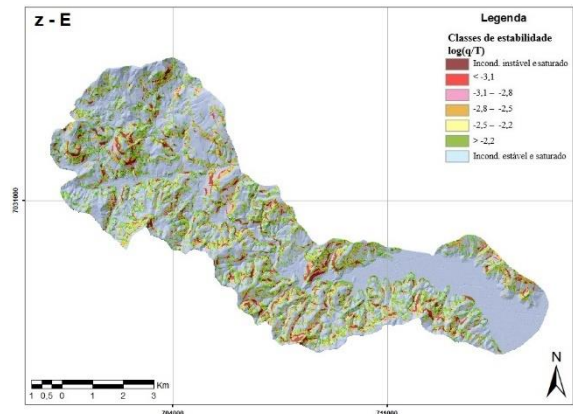
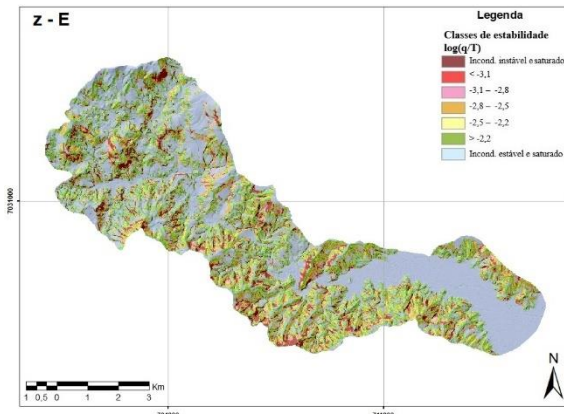
CENÁRIO C

1m

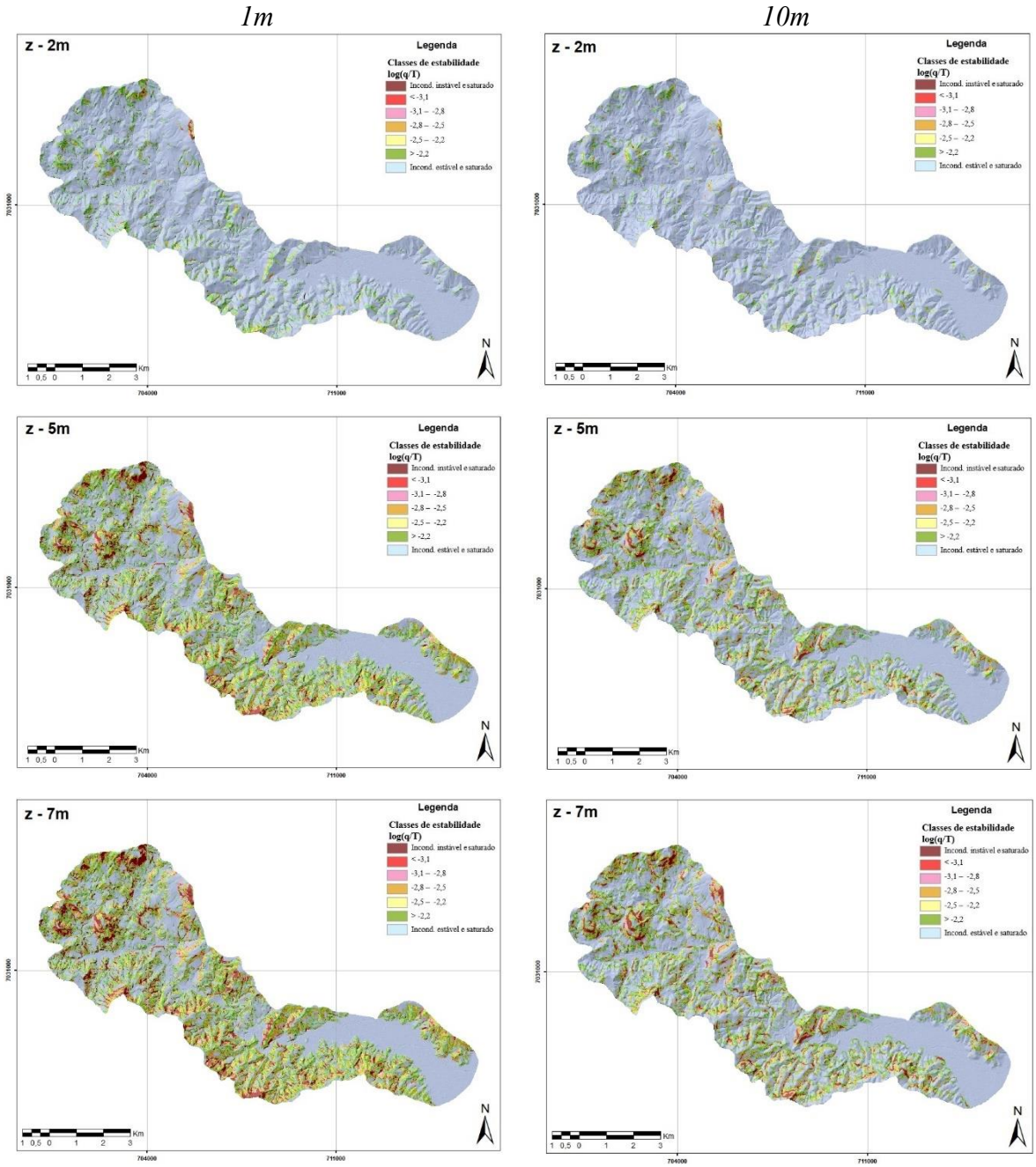
10m

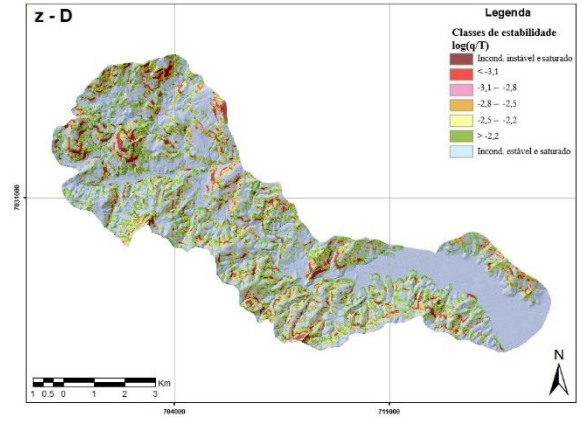
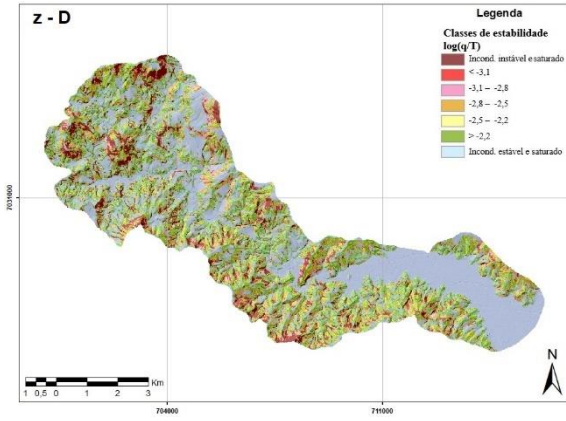
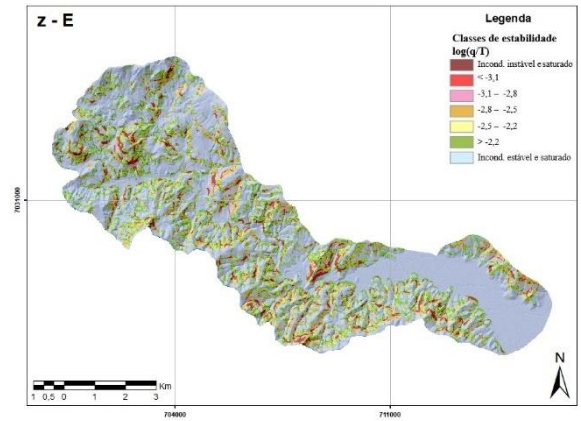
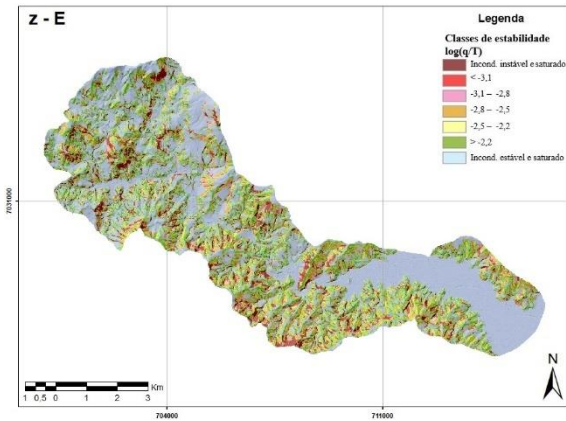
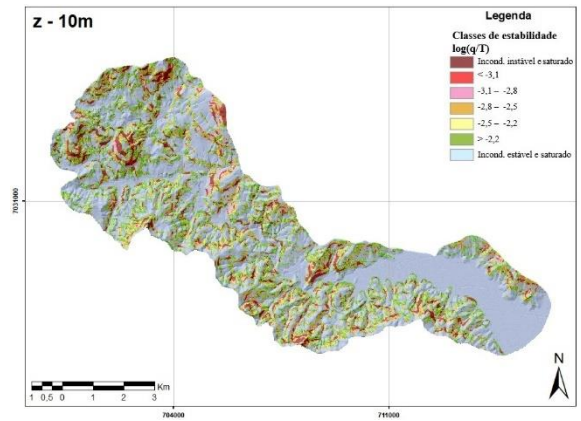
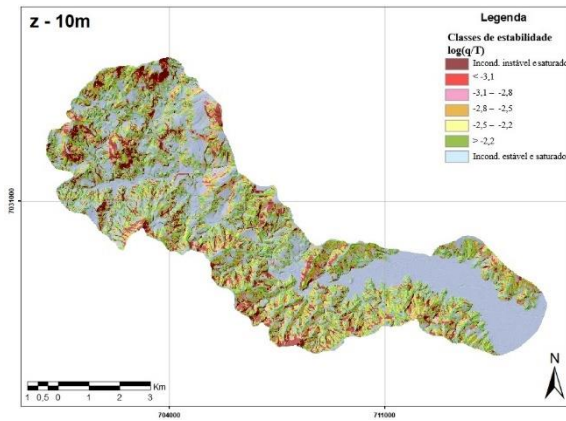


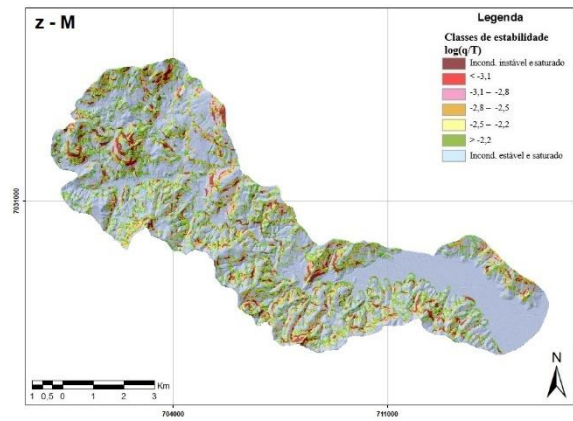
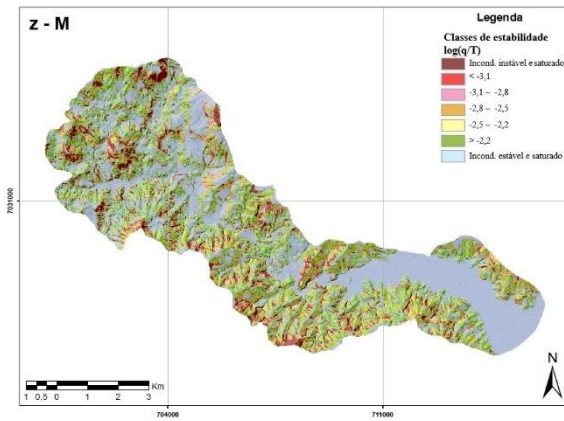




CENÁRIO D



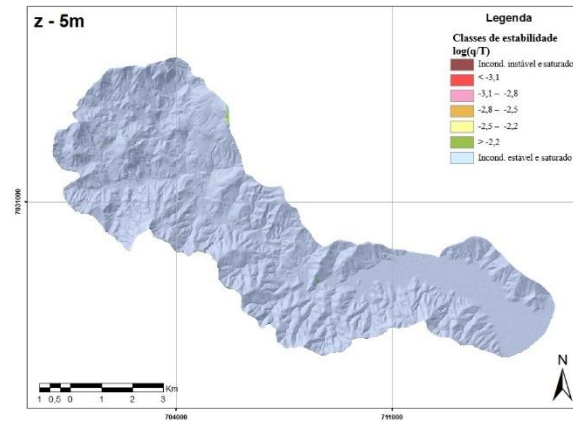
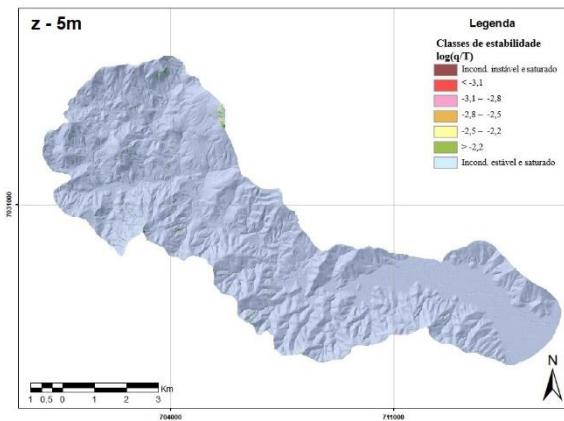
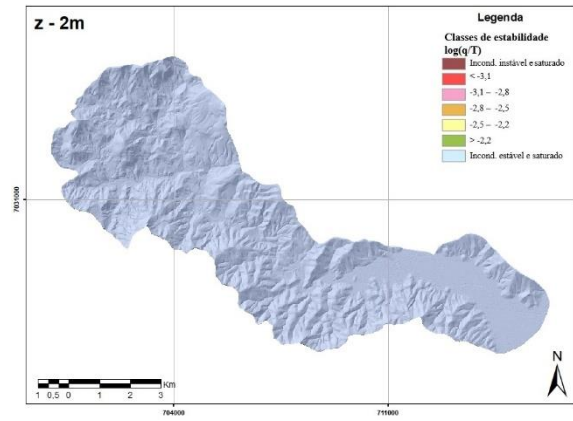
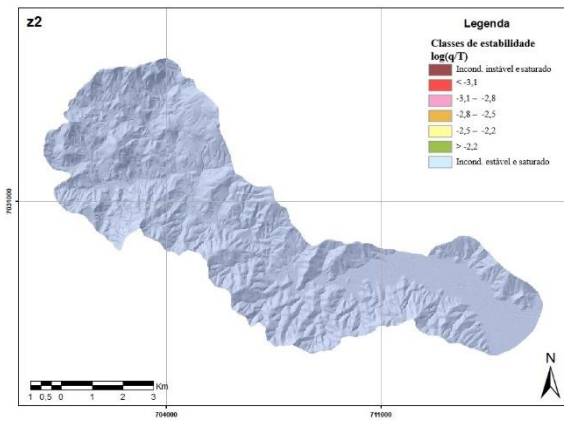


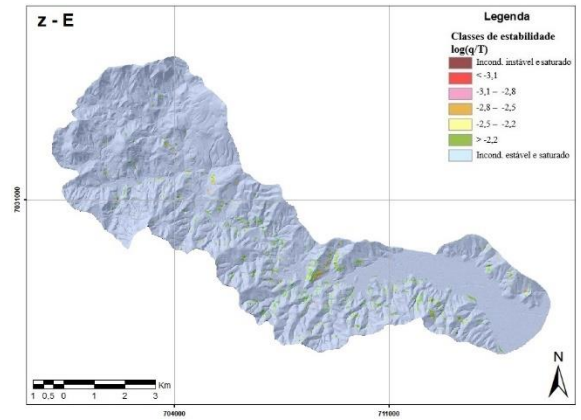
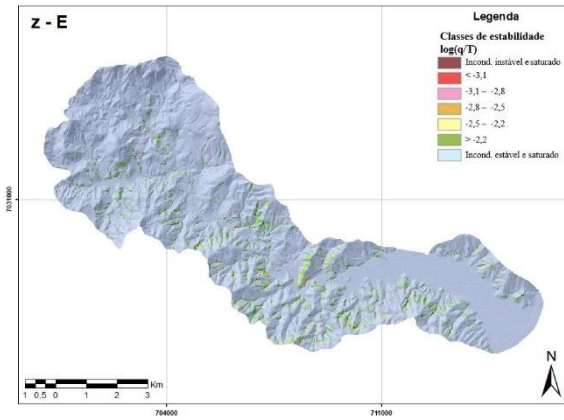
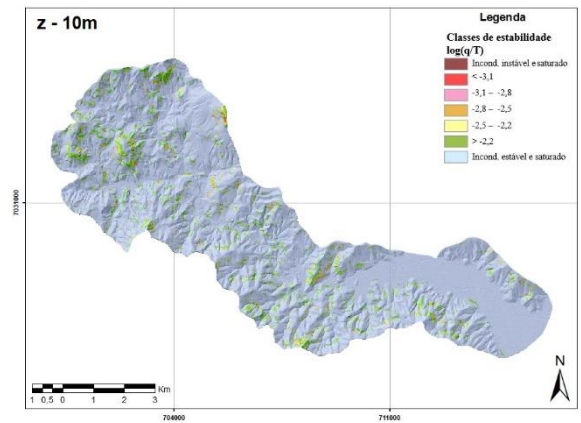
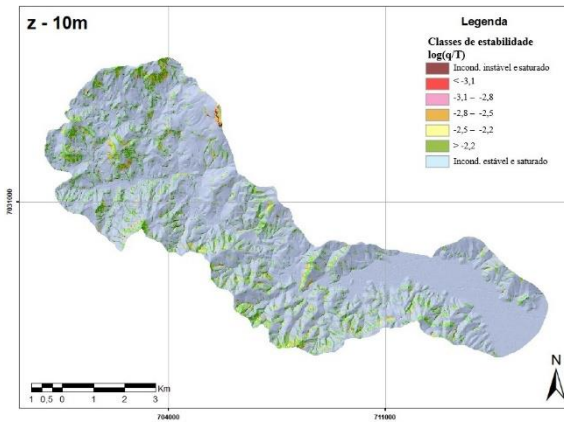
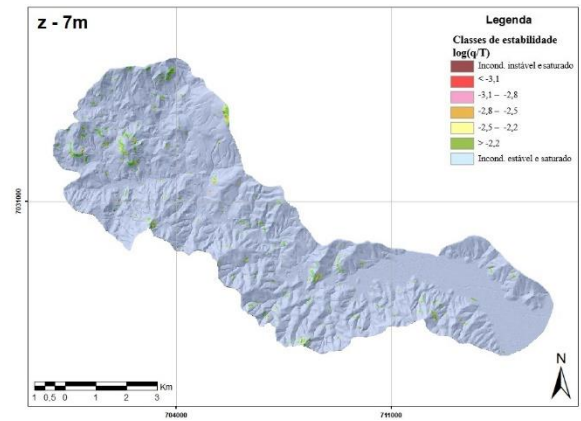
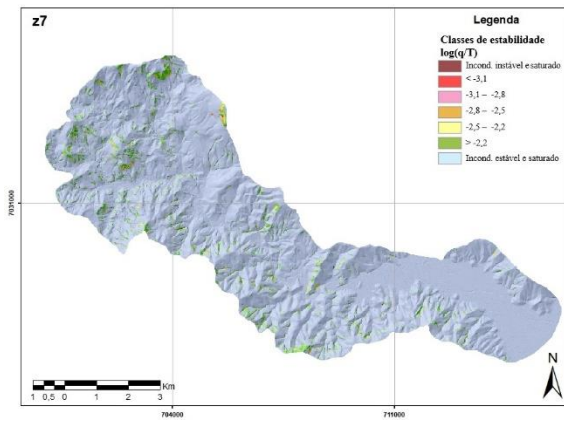


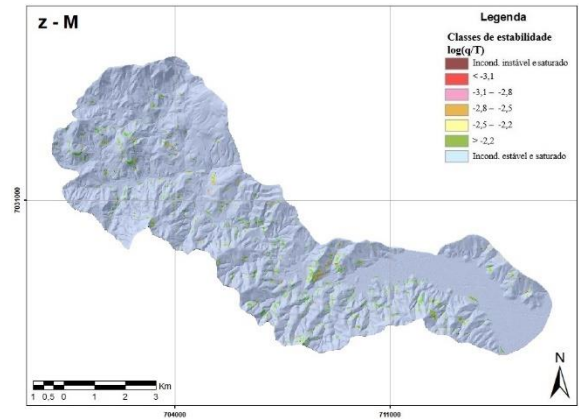
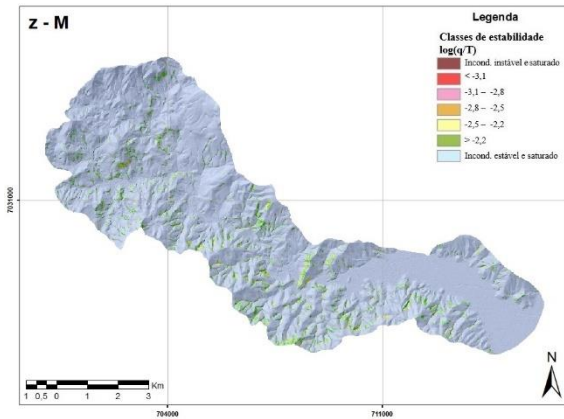
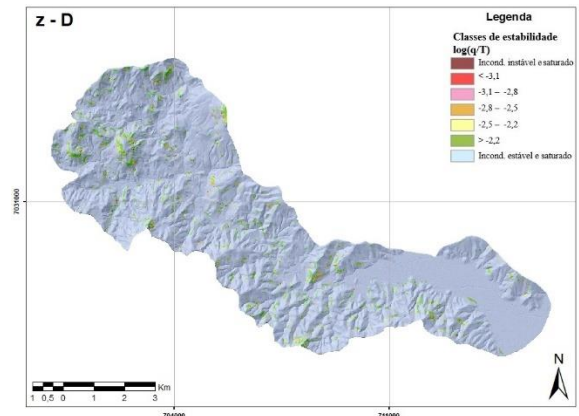
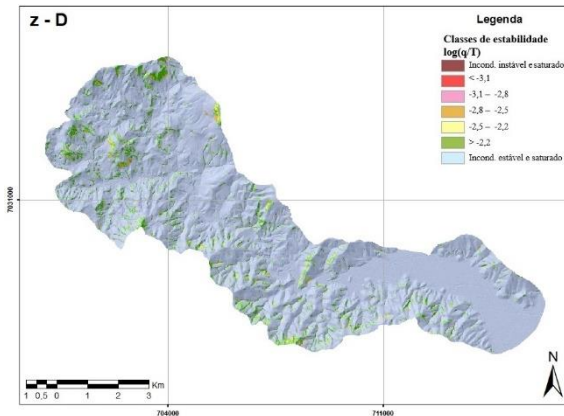
CENÁRIO E

1m

10m



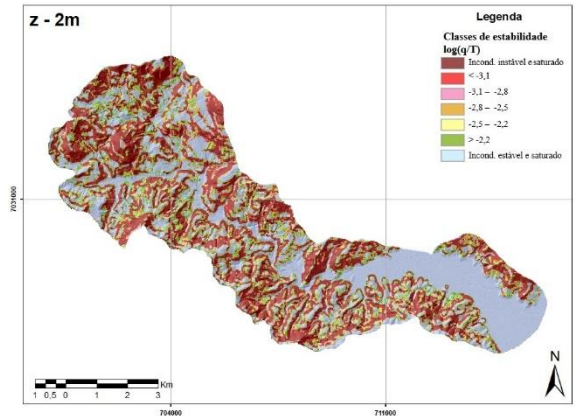
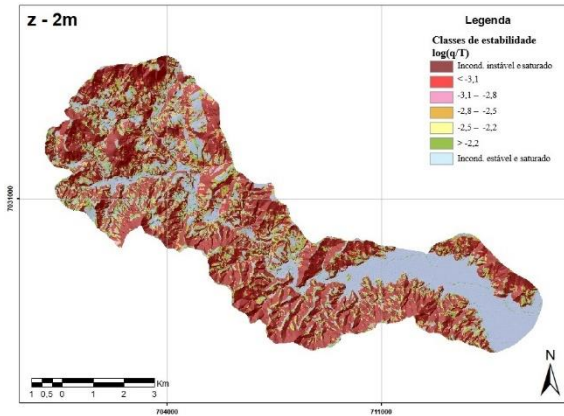


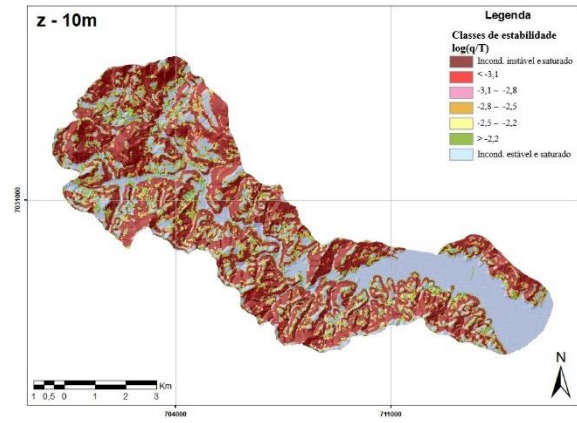
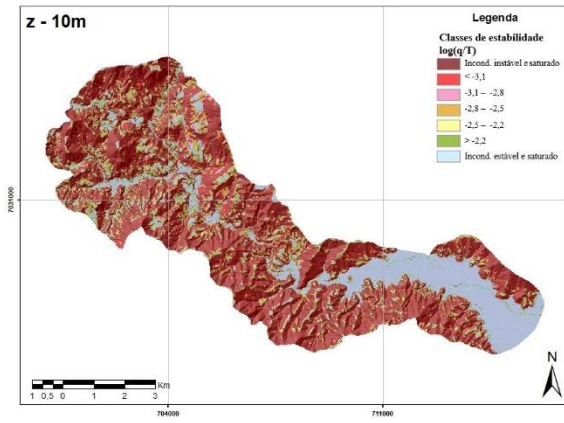
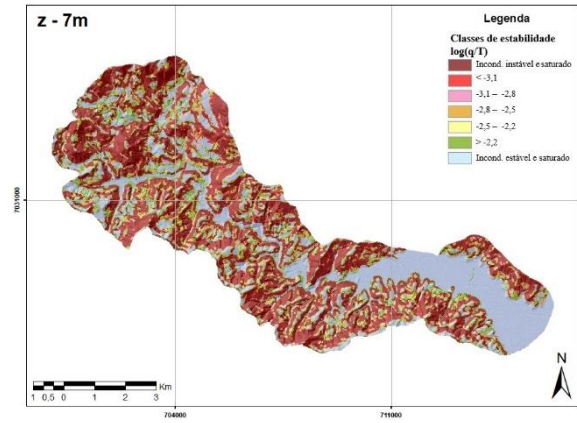
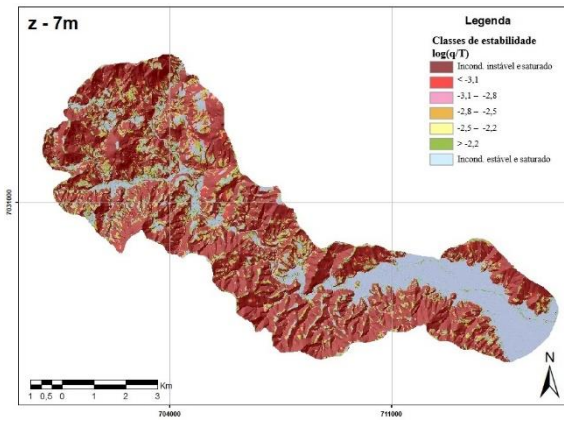
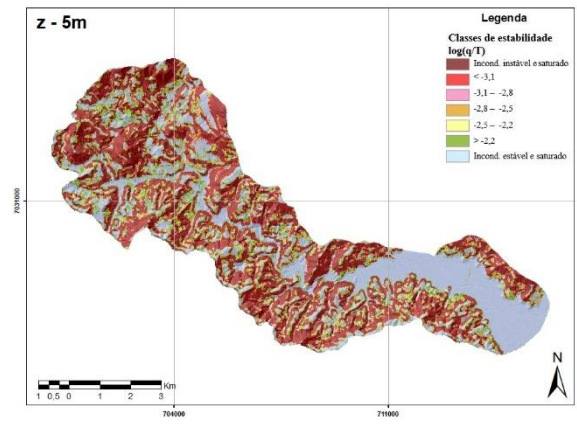
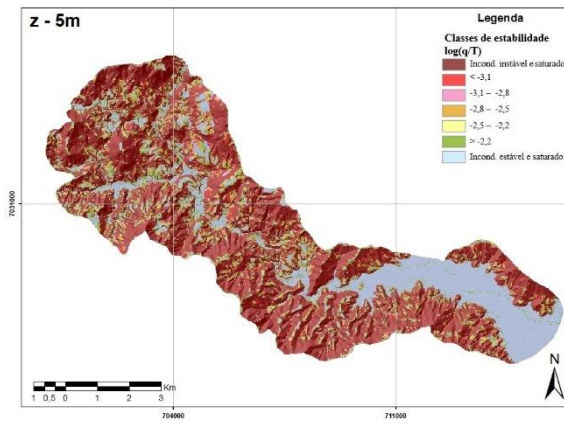


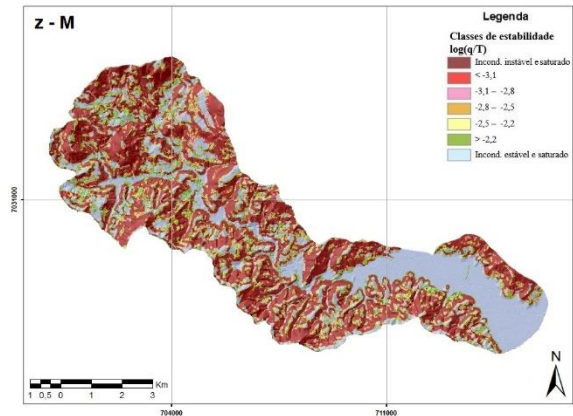
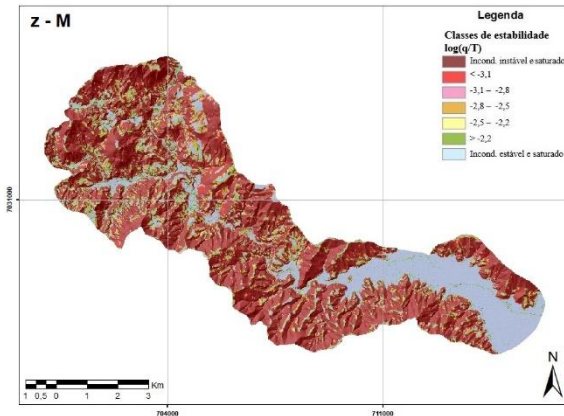
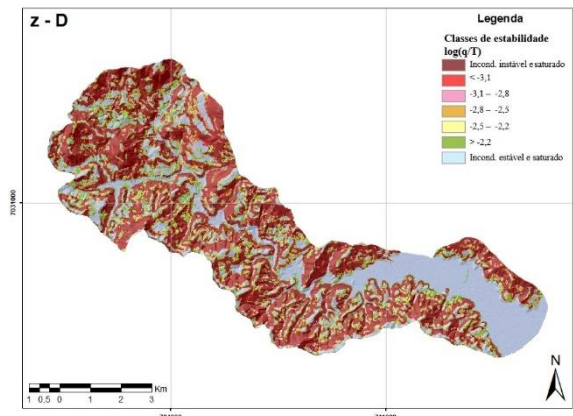
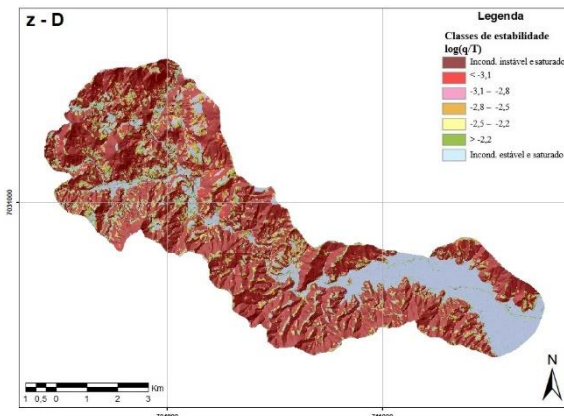
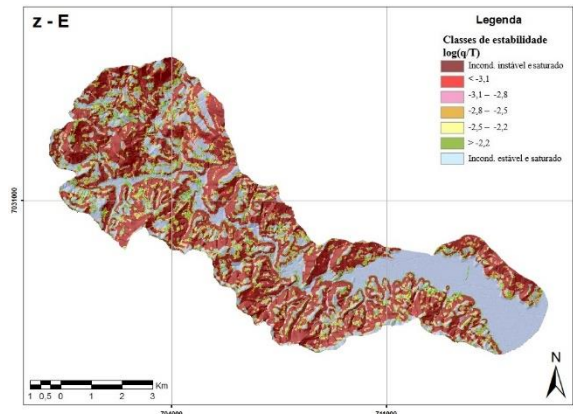
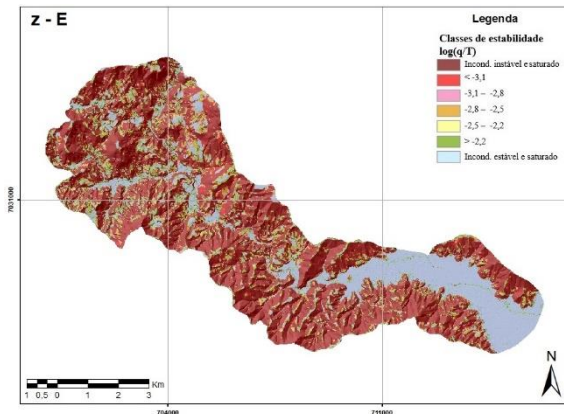
CENÁRIO F

1m

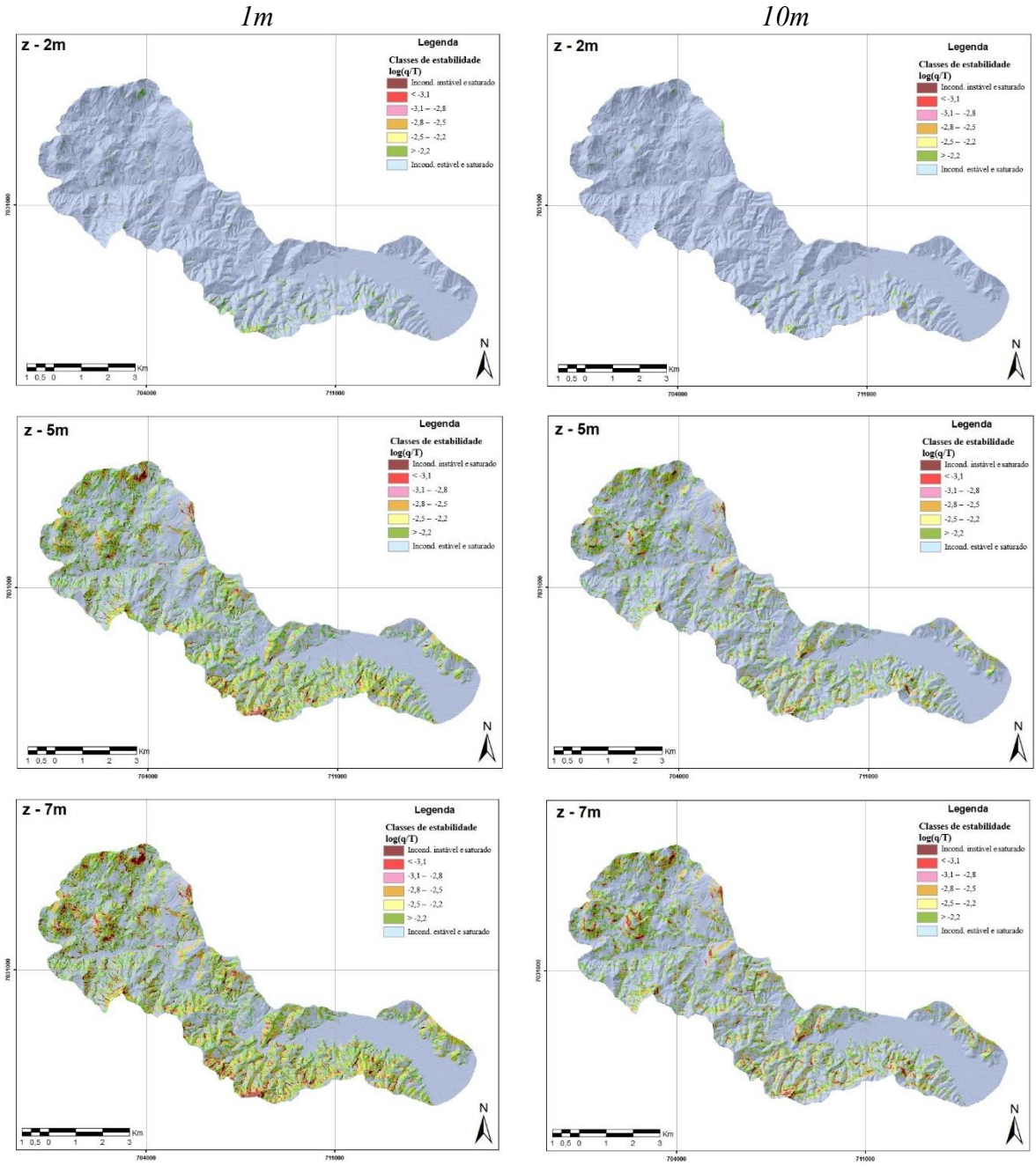
10m

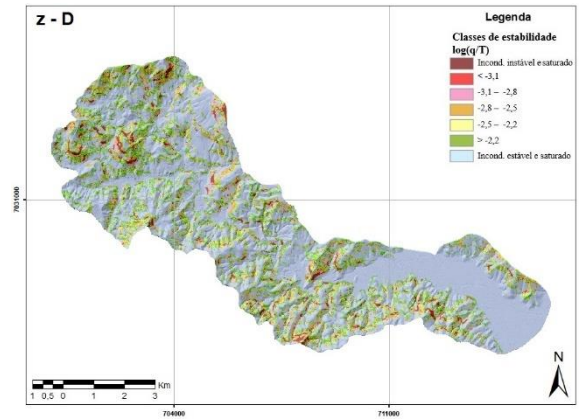
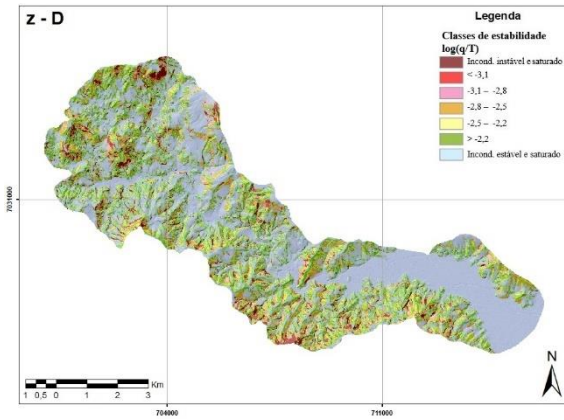
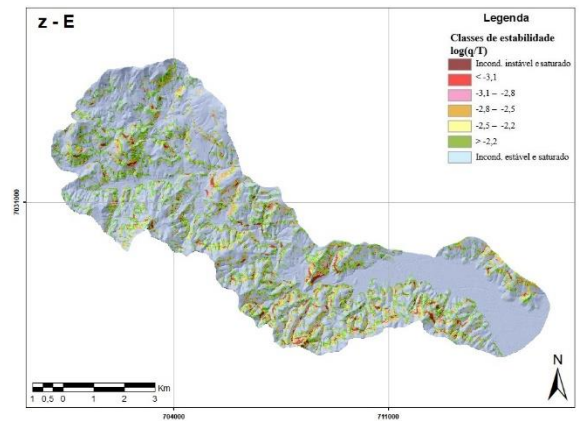
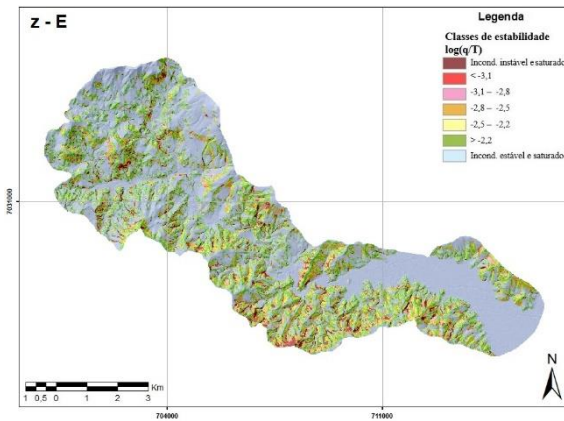
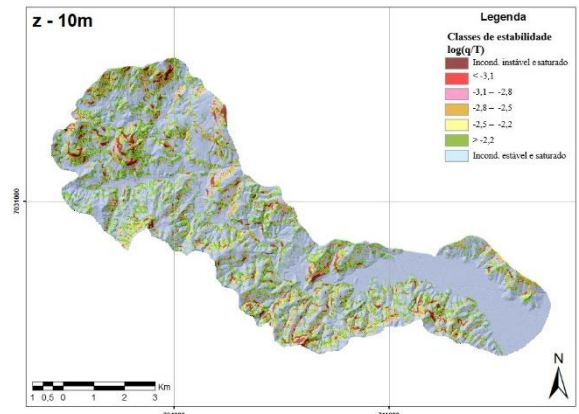
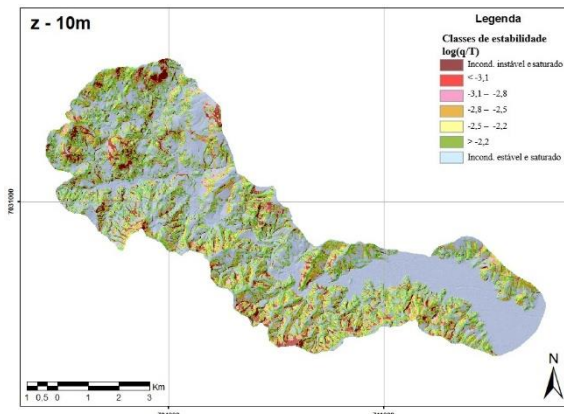


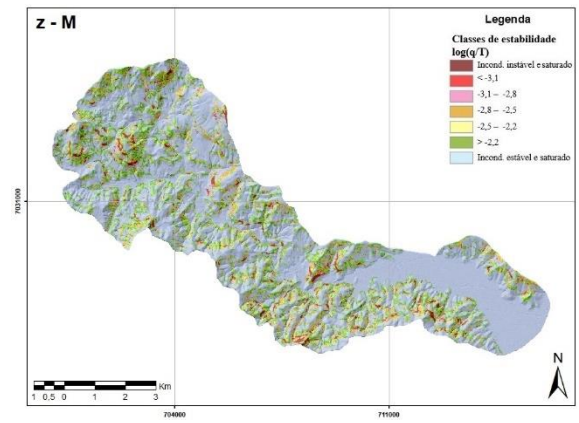
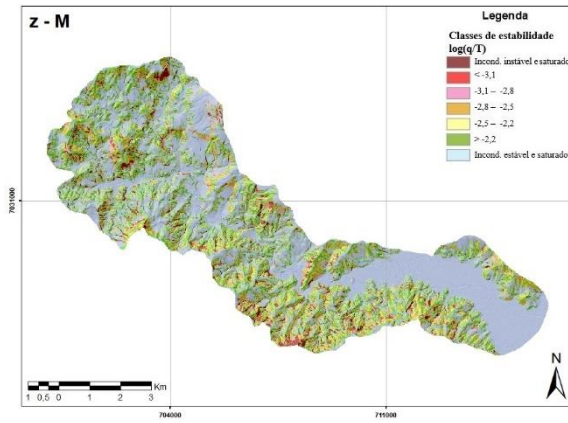




CENÁRIO G



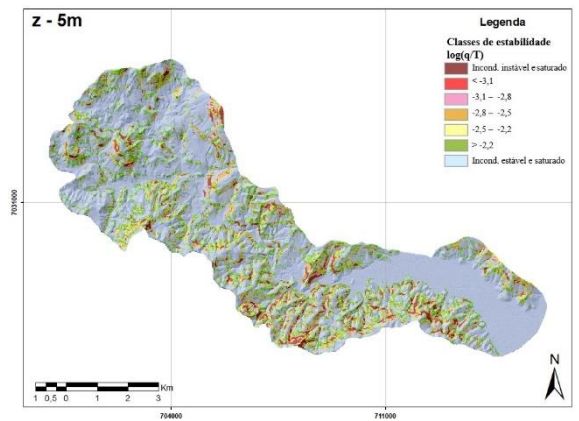
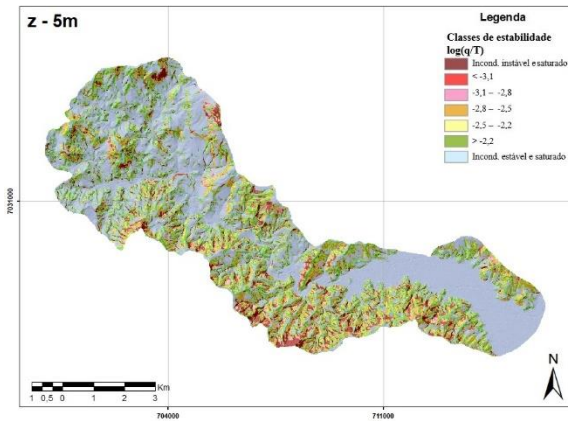
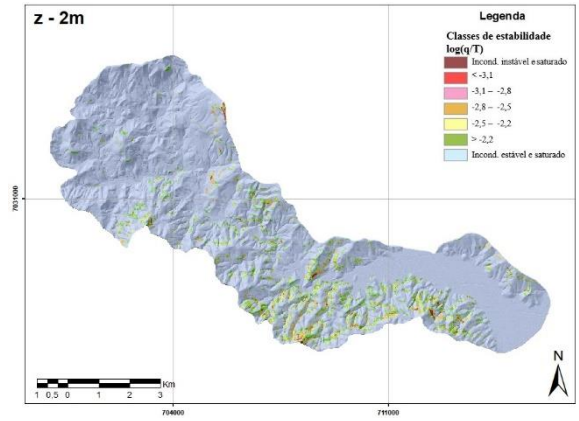
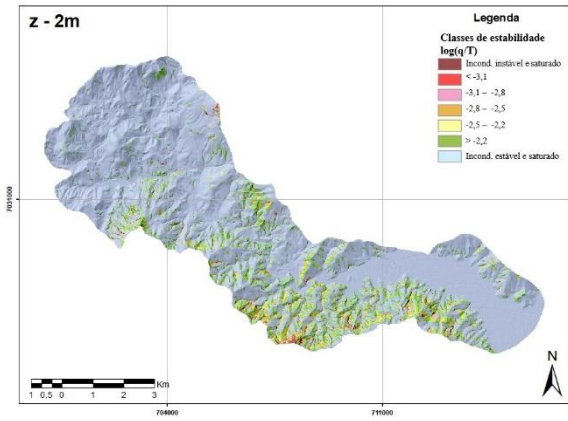


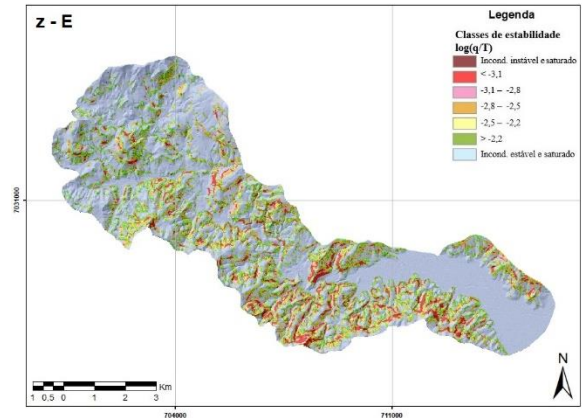
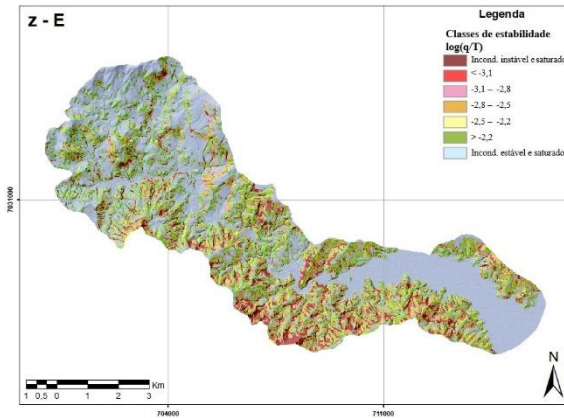
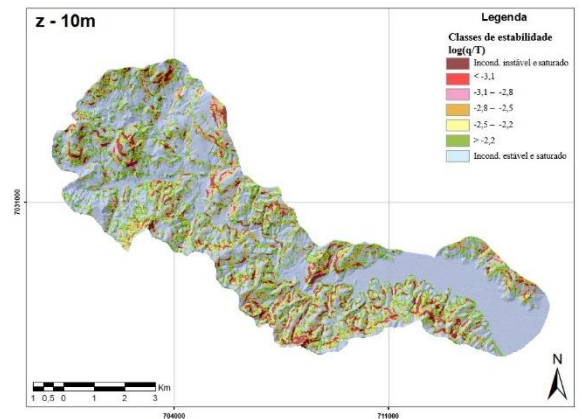
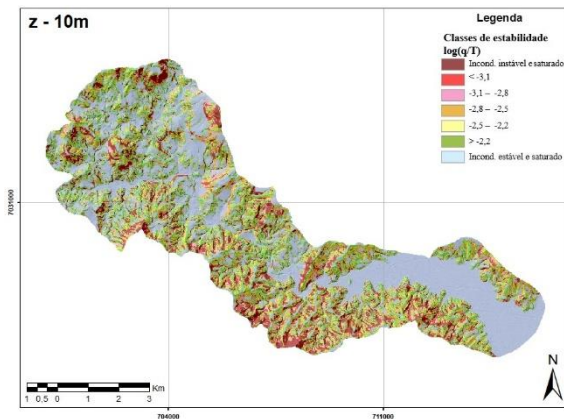
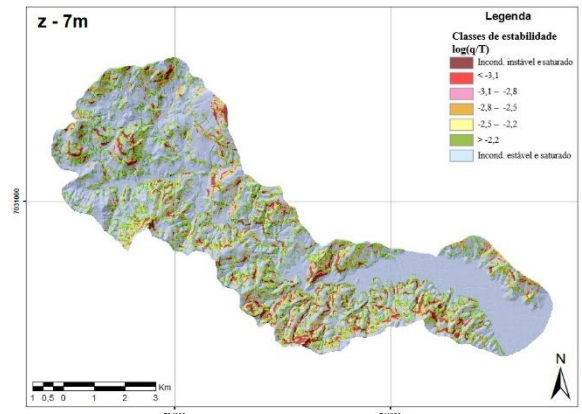
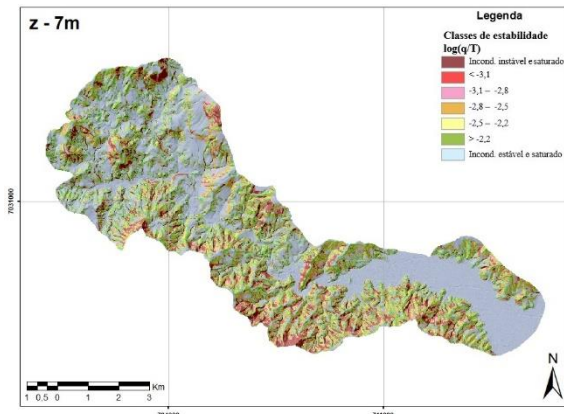


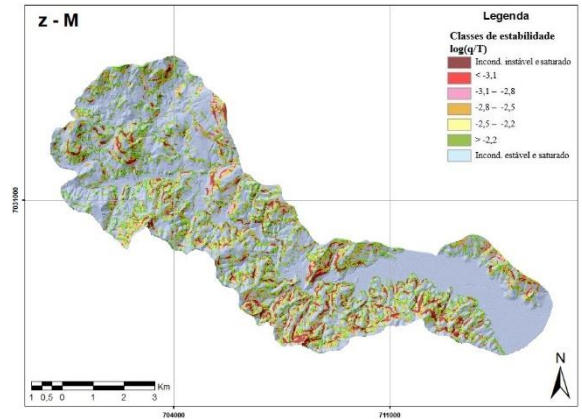
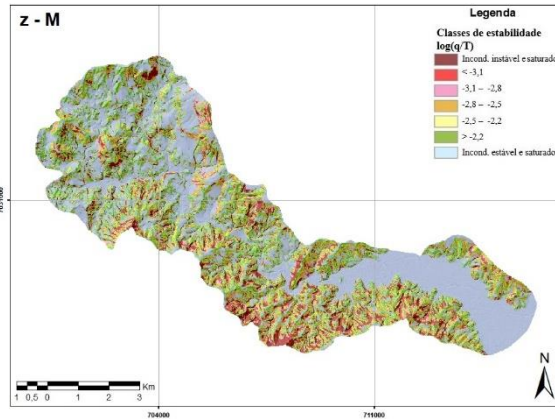
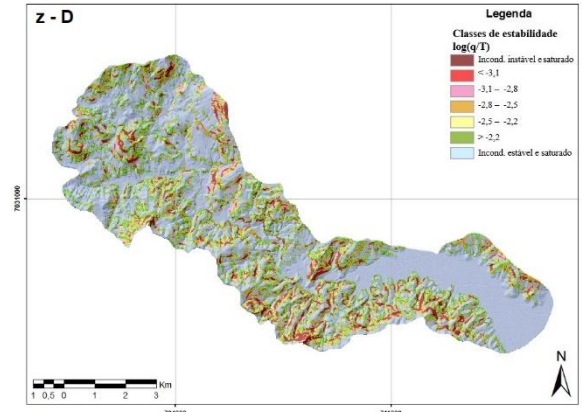
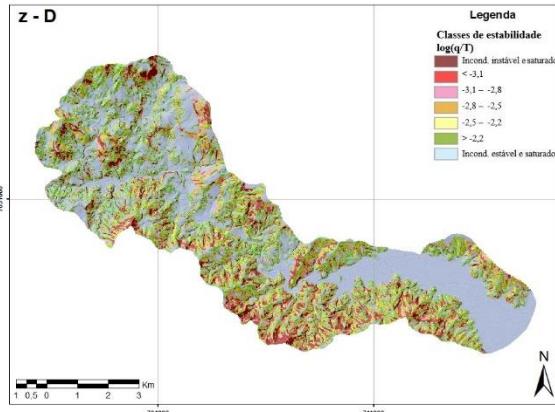
CENÁRIO H

1m

10m



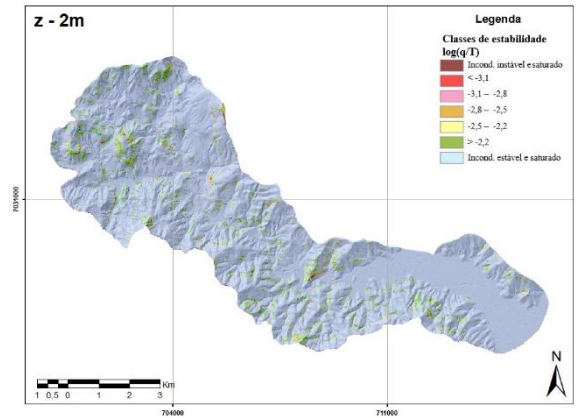
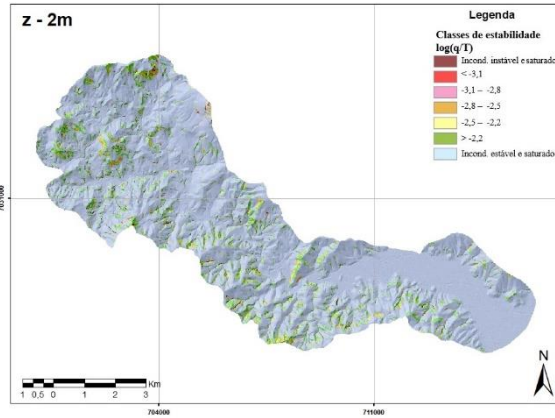


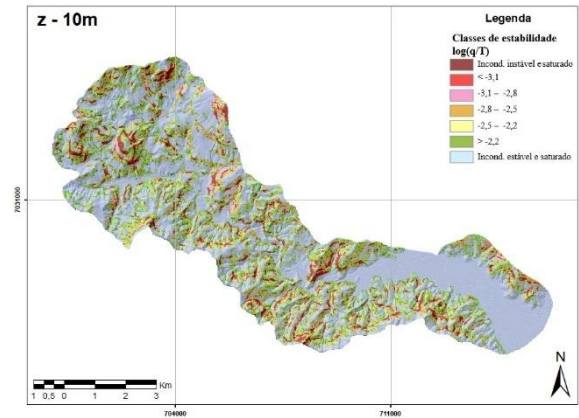
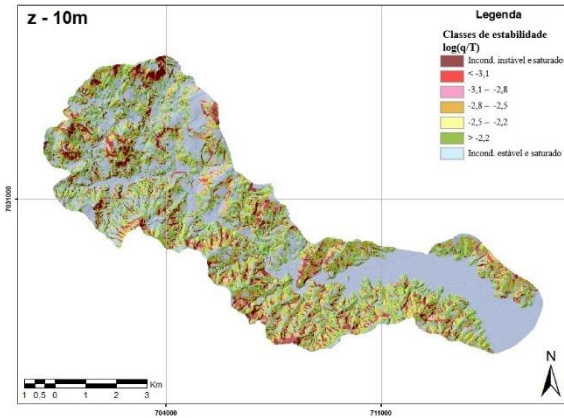
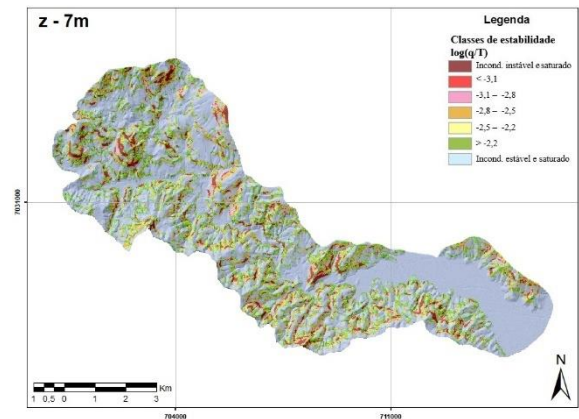
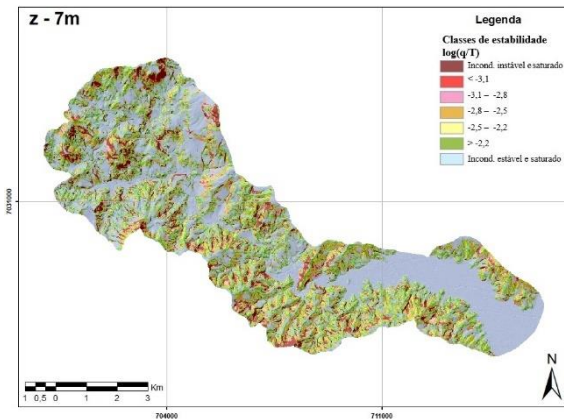
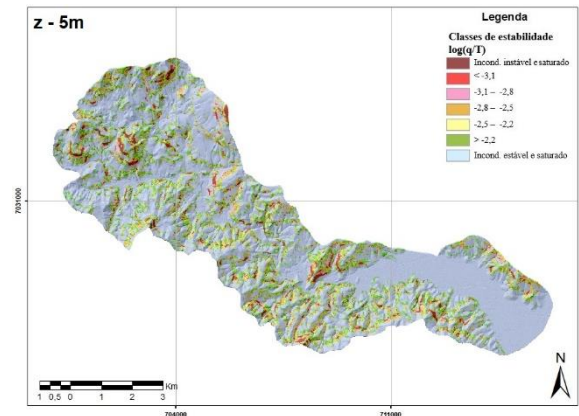
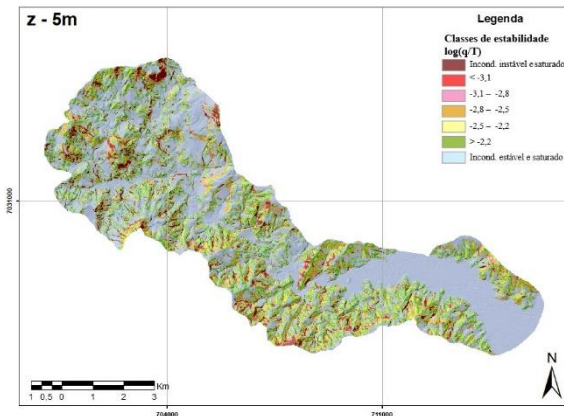


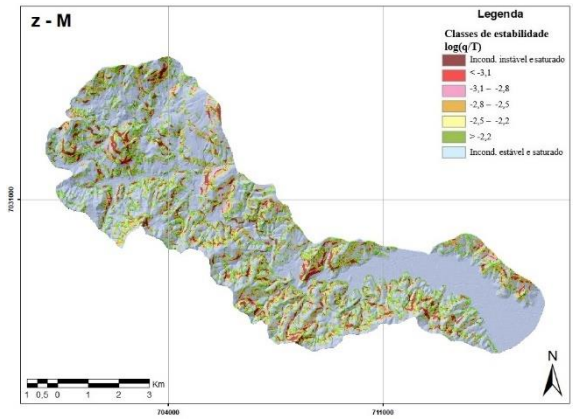
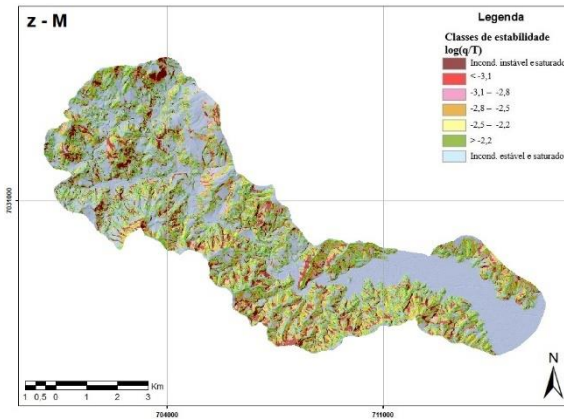
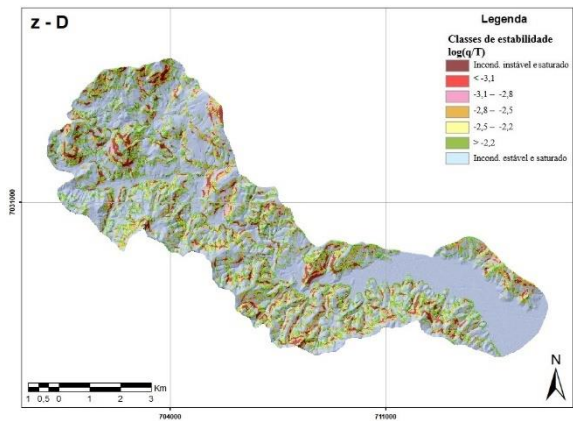
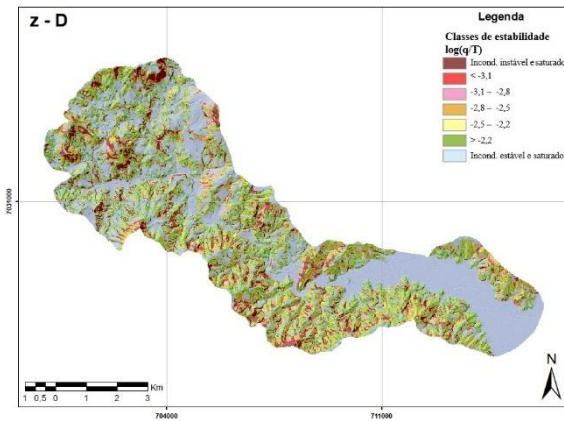
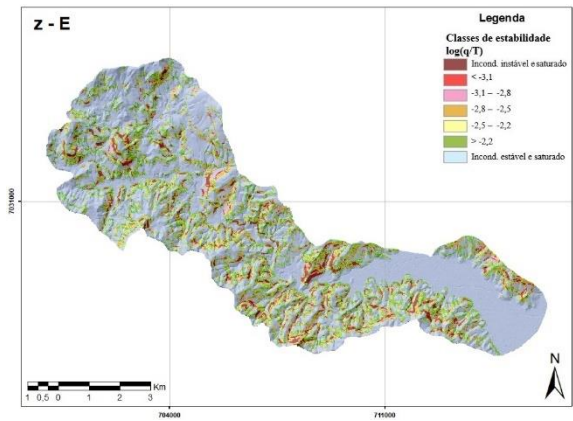
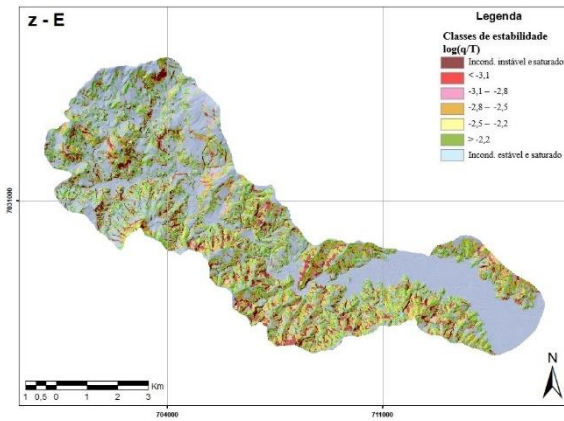
CENÁRIO I

1m

10m



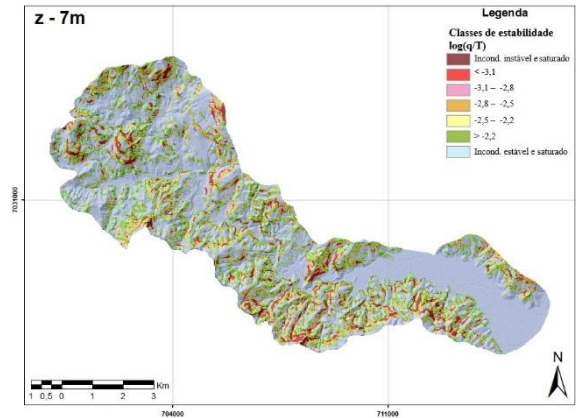
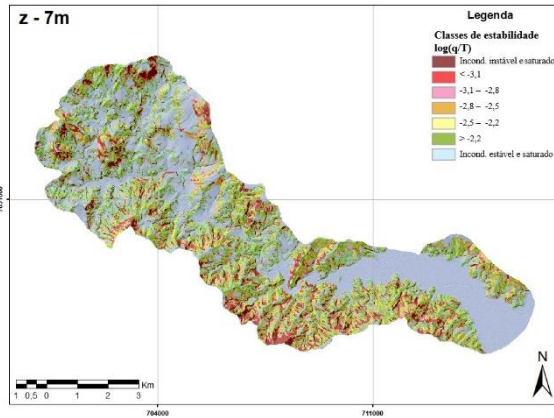
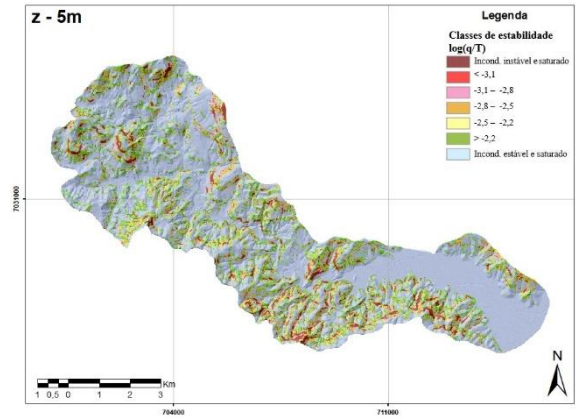
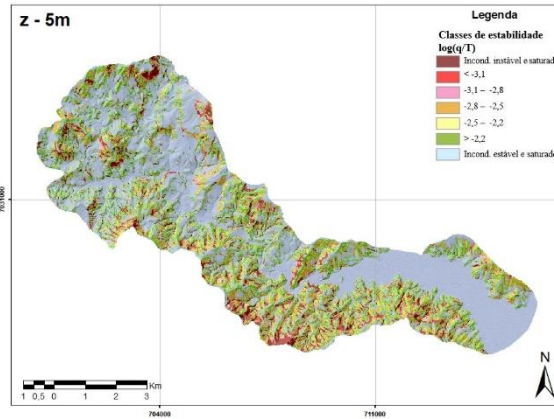
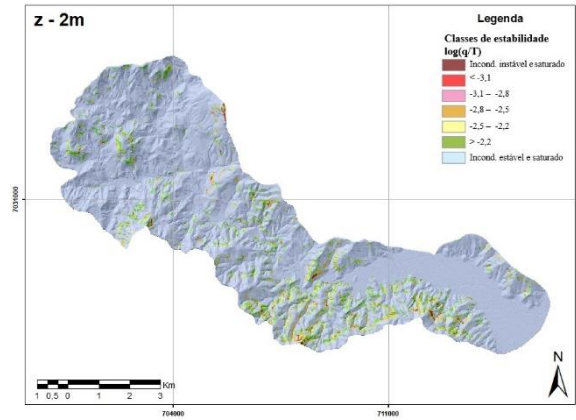
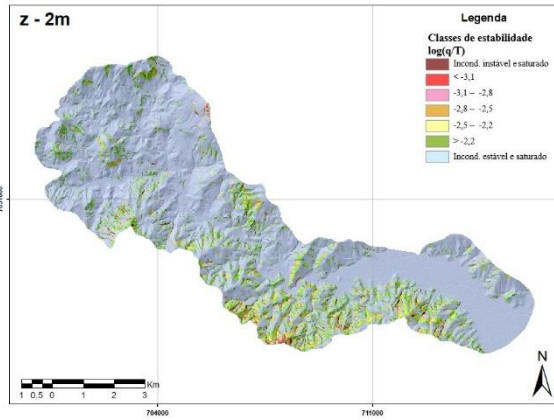


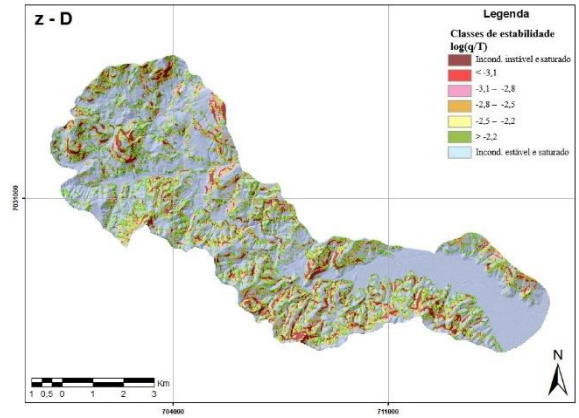
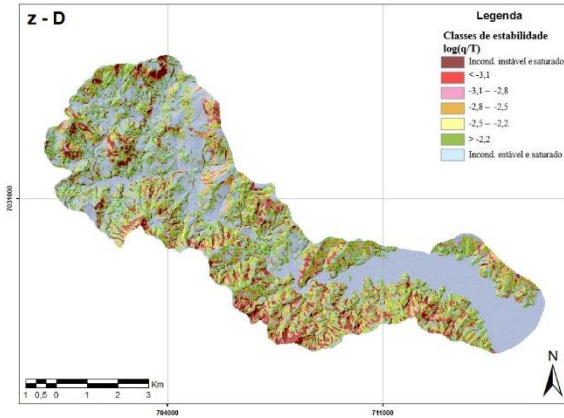
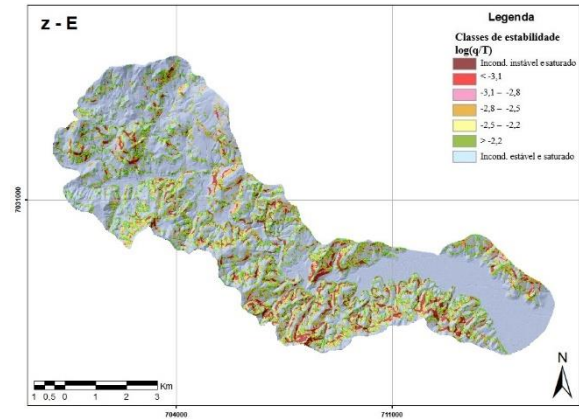
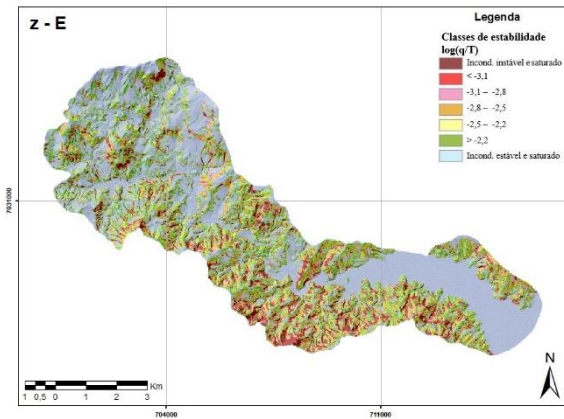
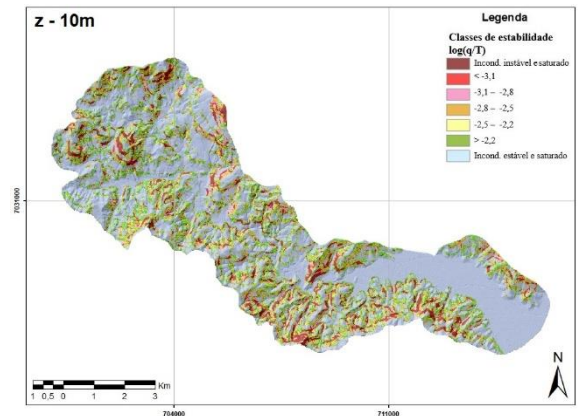
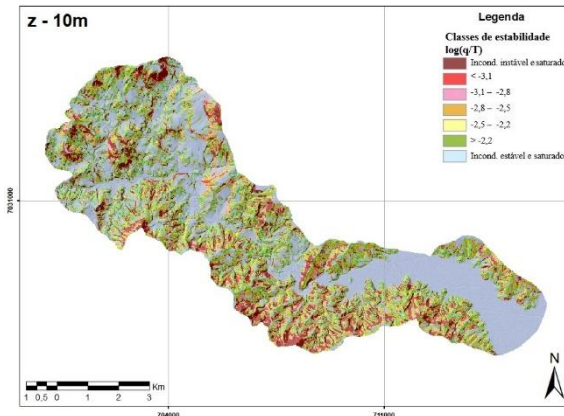


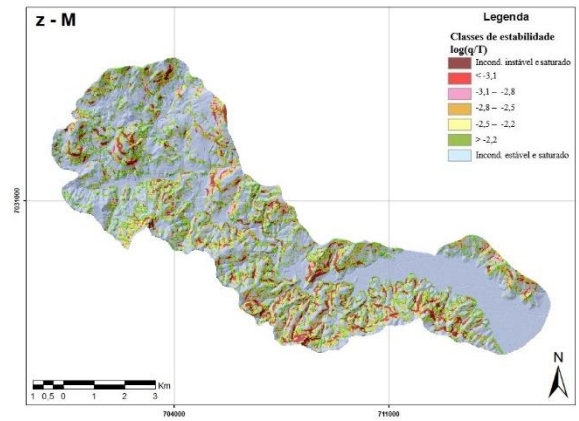
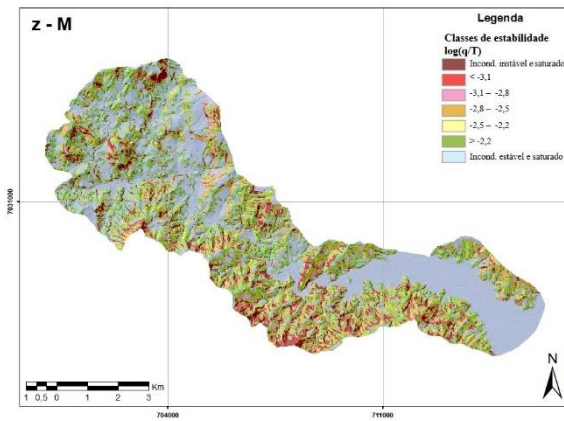
CENÁRIO J

1m

10m



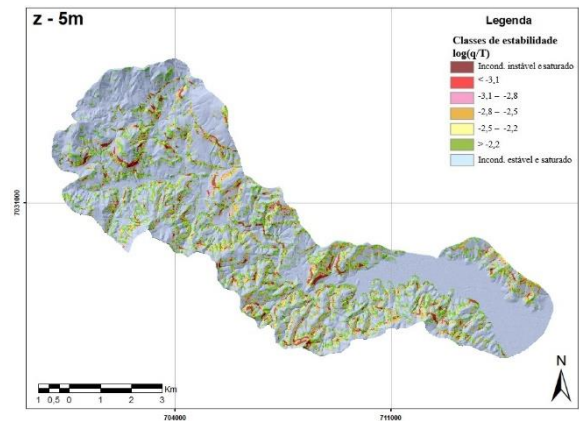
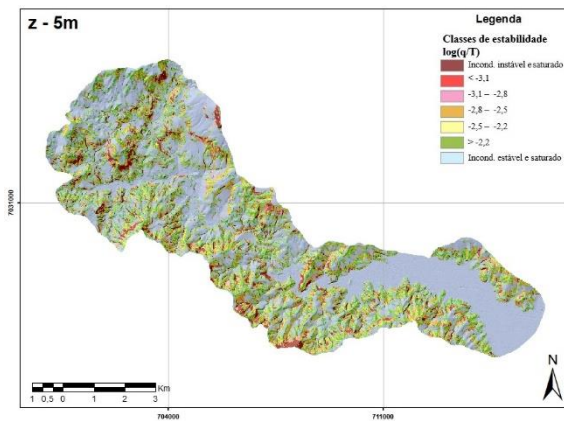
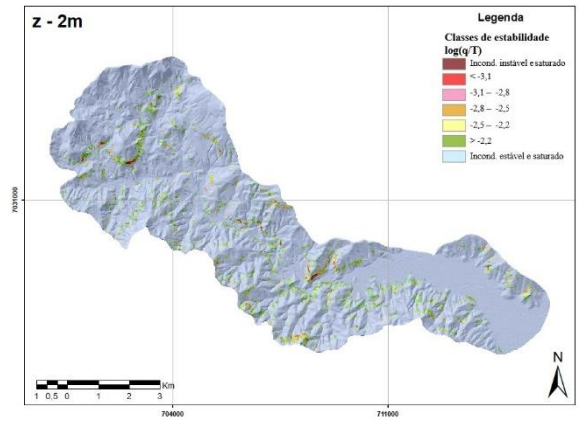
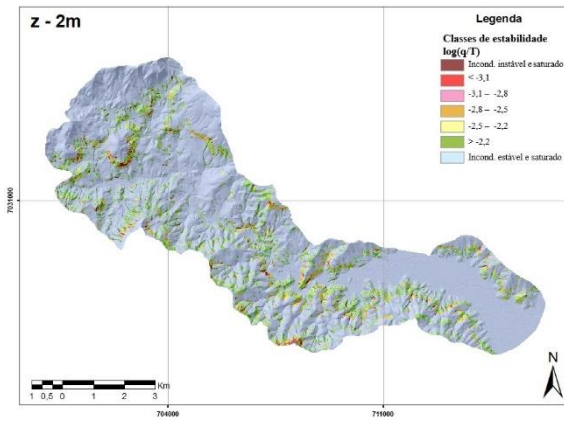


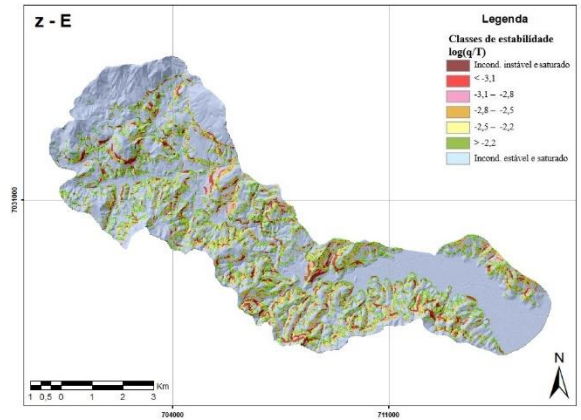
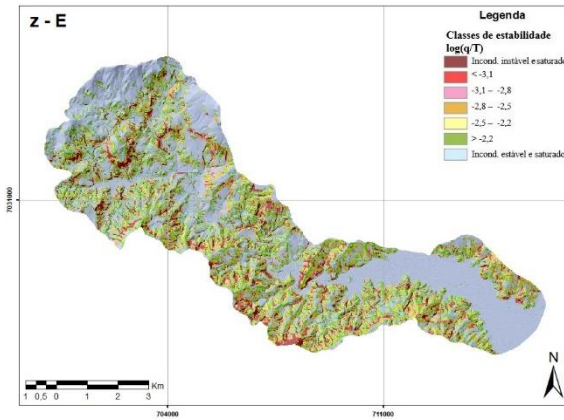
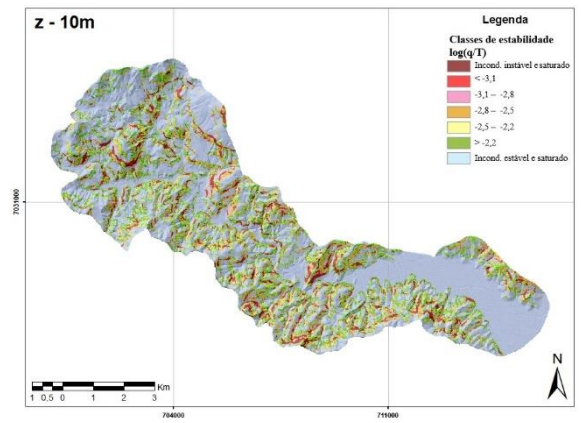
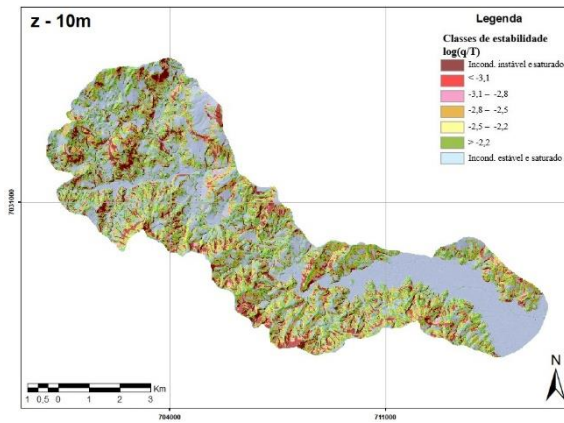
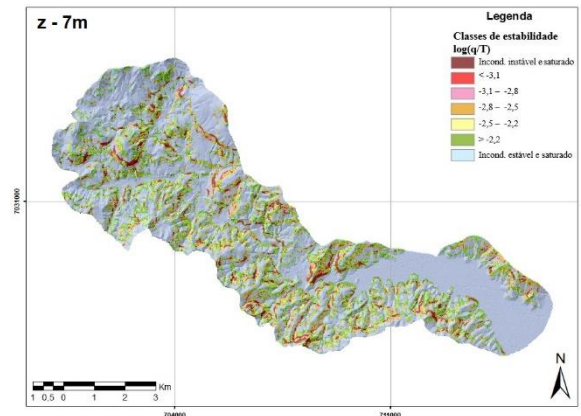
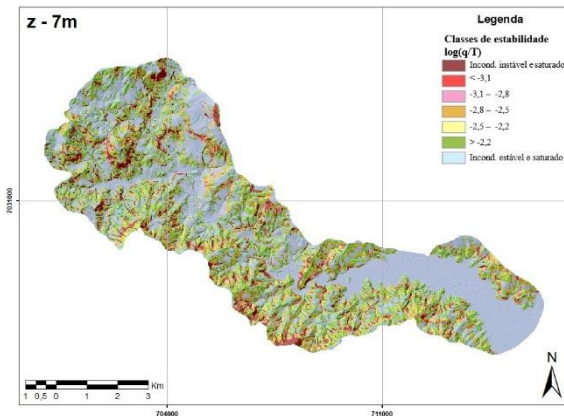


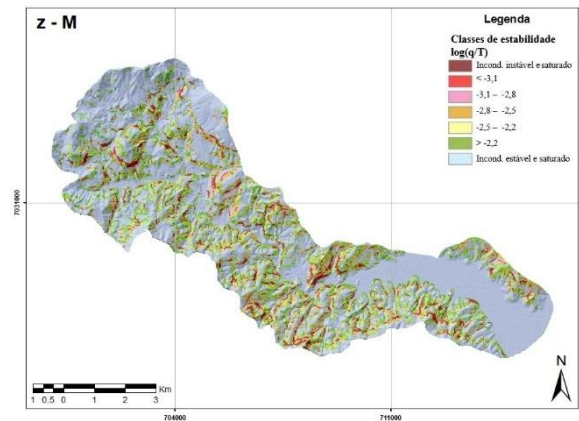
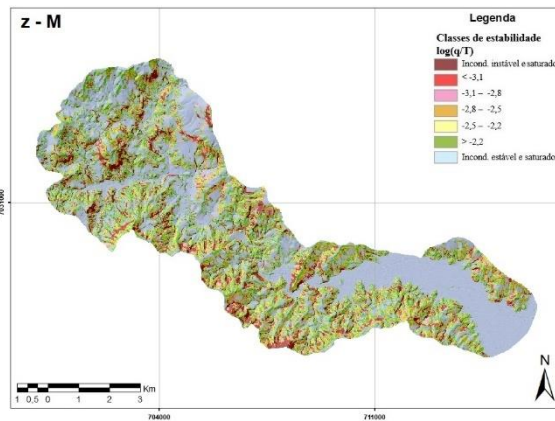
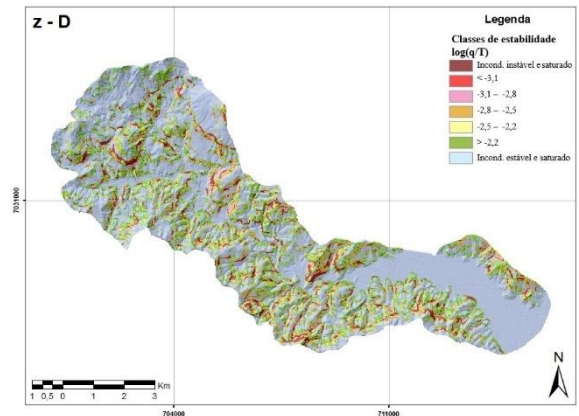
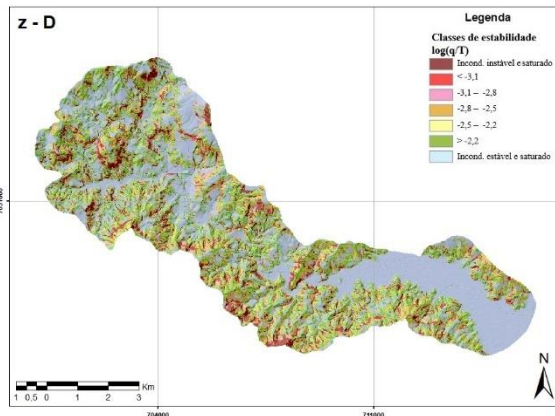
CENÁRIO K

1m

10m



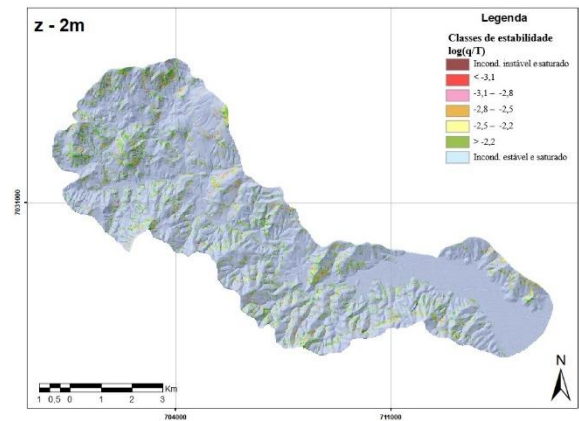
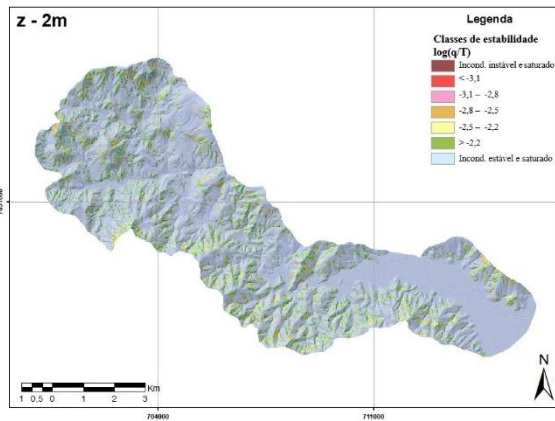


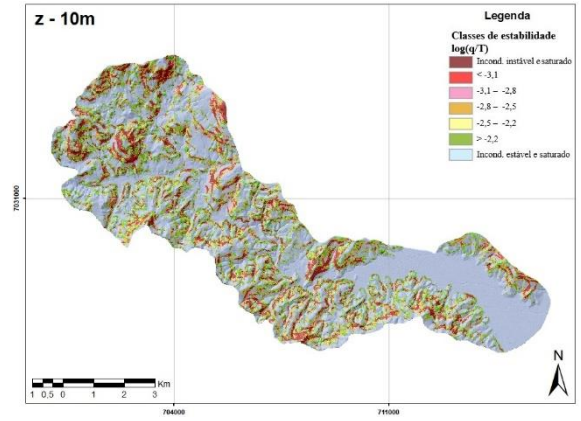
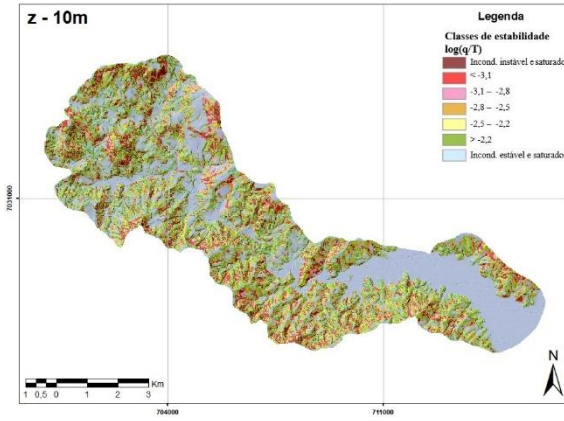
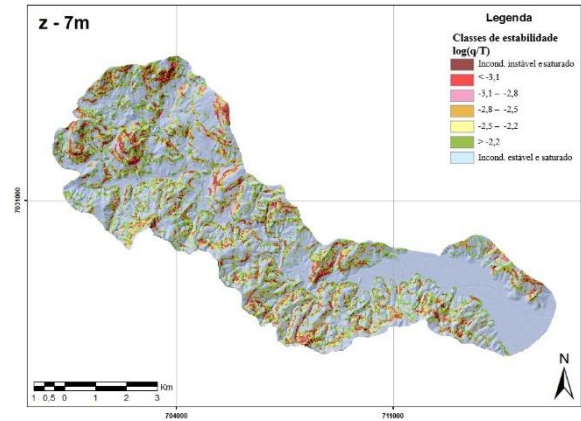
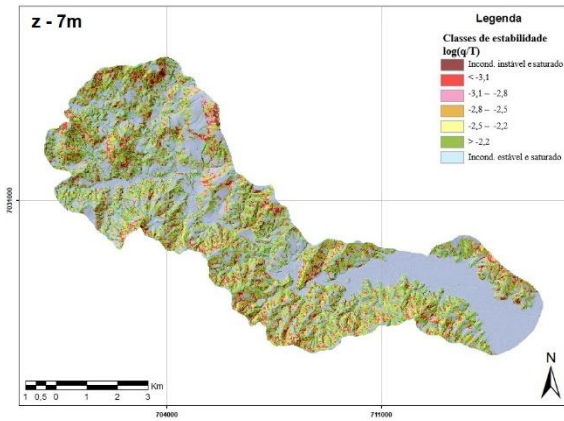
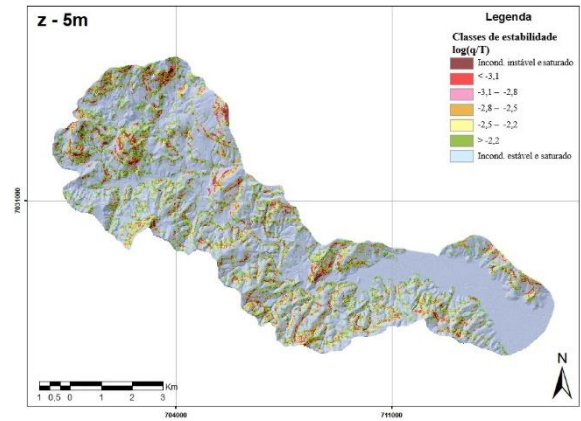
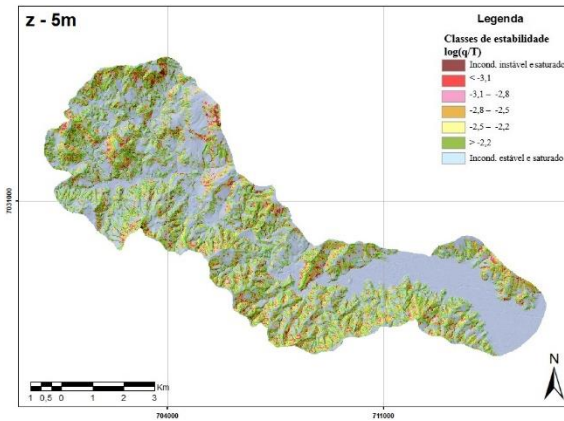


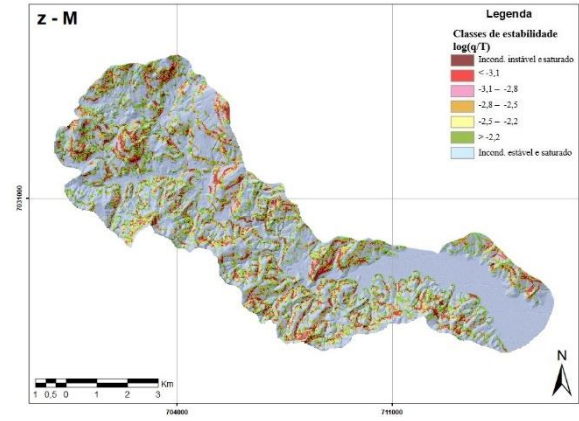
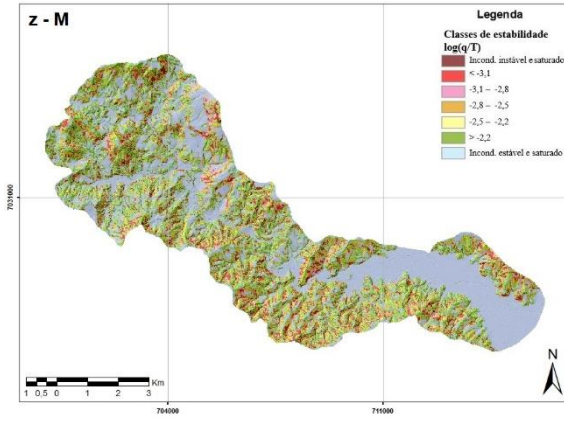
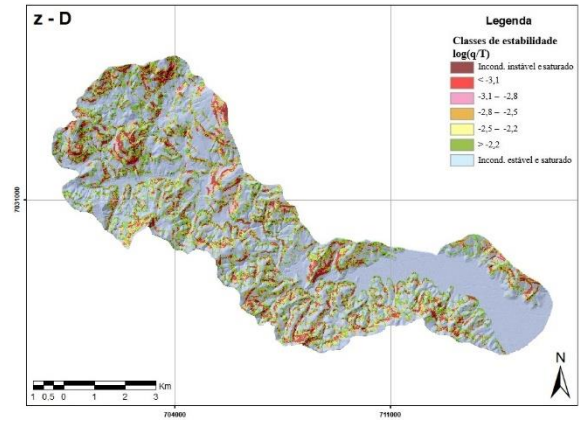
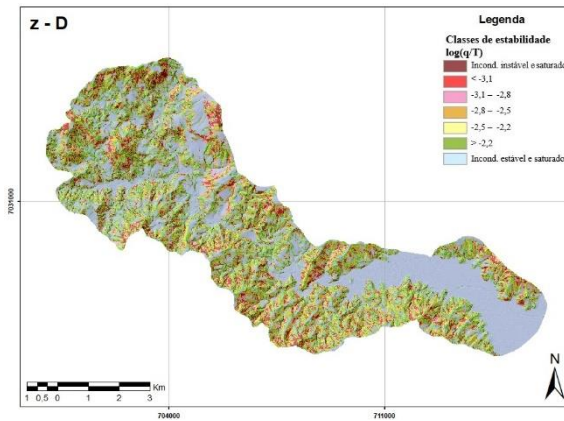
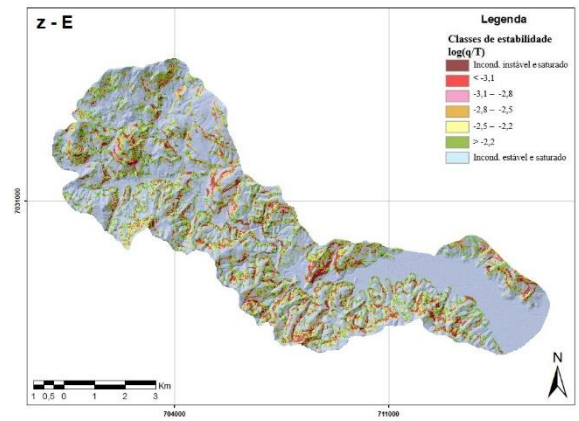
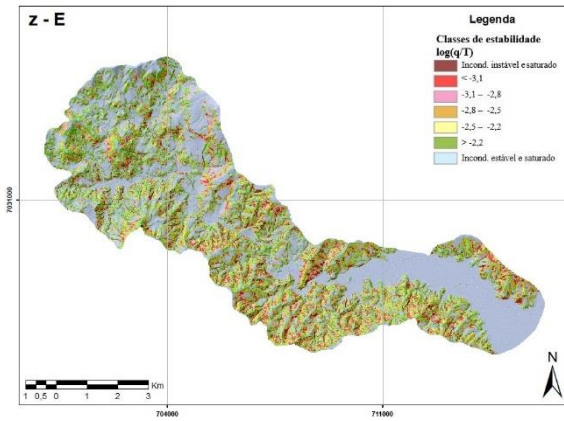
CENÁRIO L

1m

10m



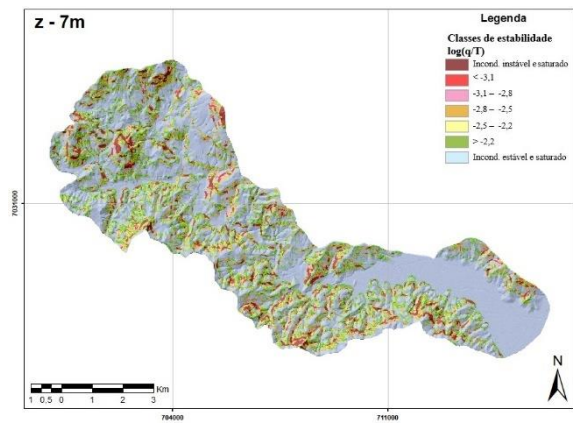
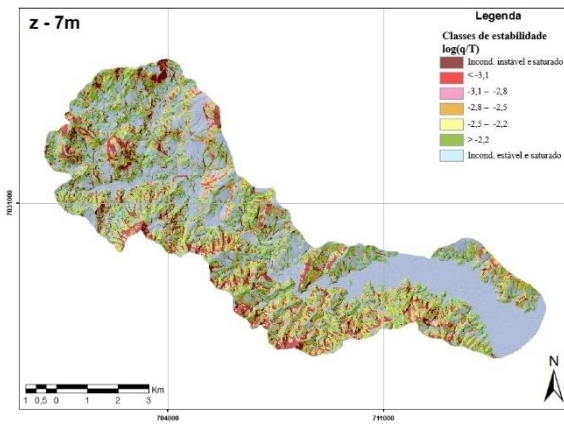
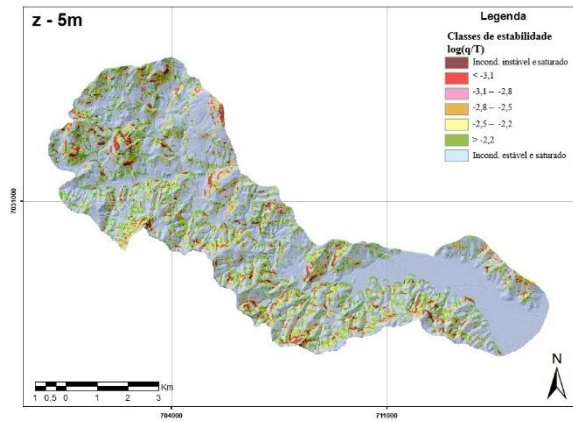
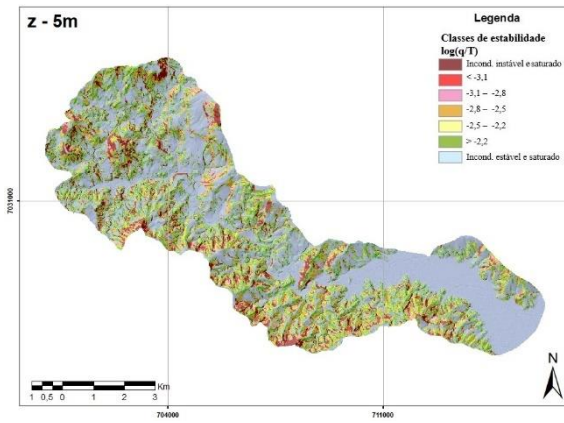
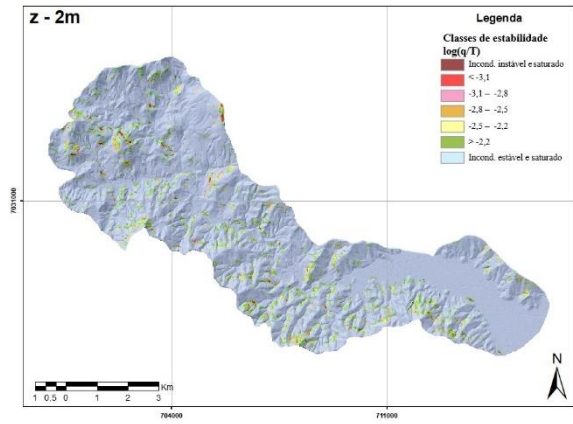
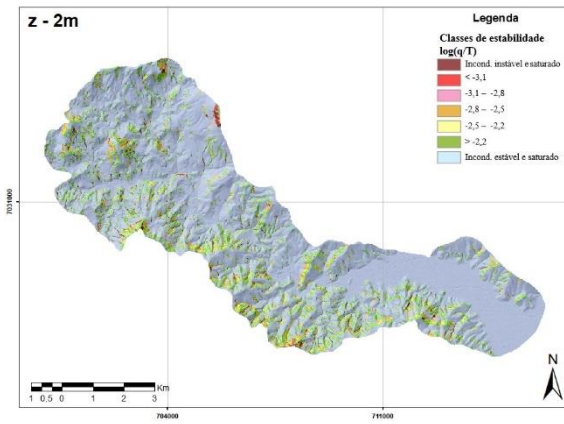


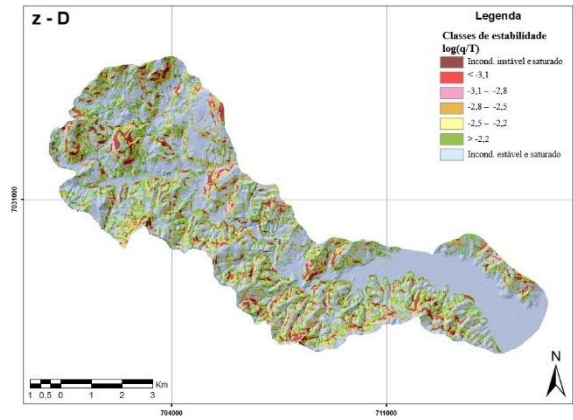
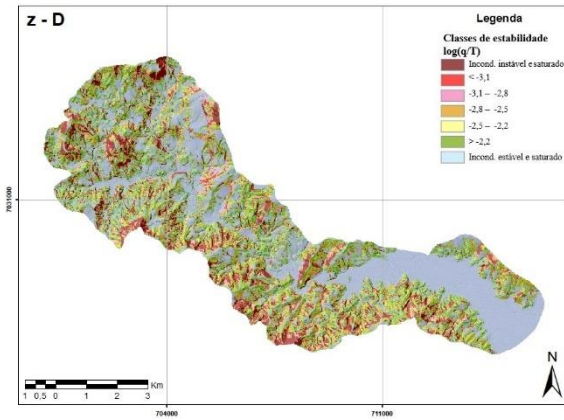
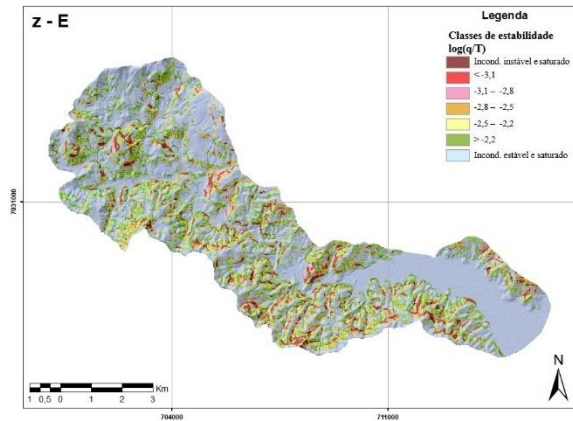
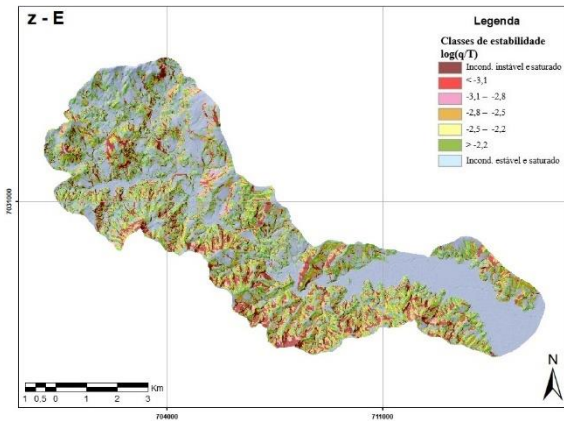
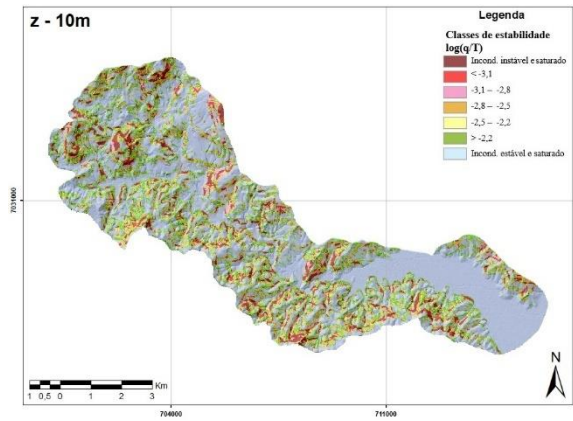
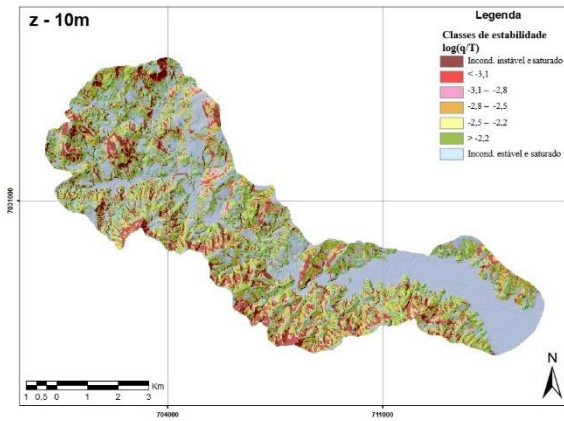


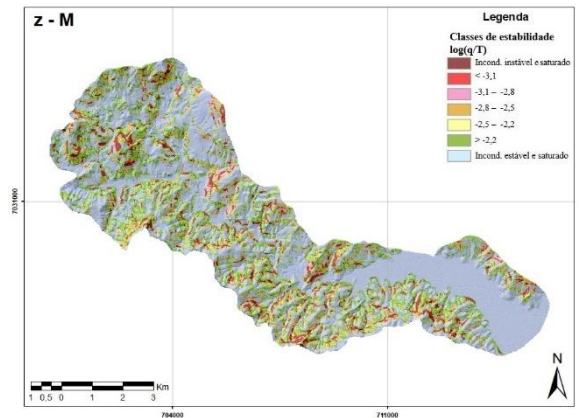
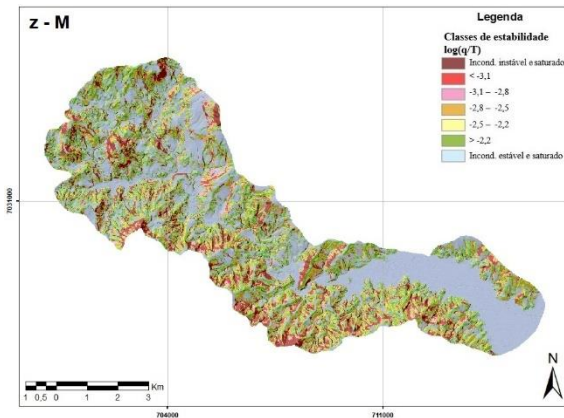
CENÁRIO M

1m

10m



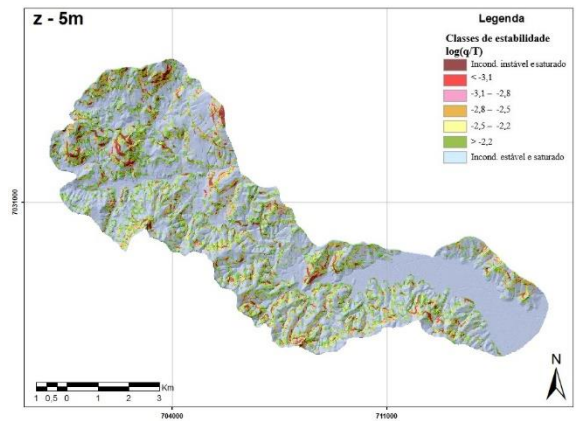
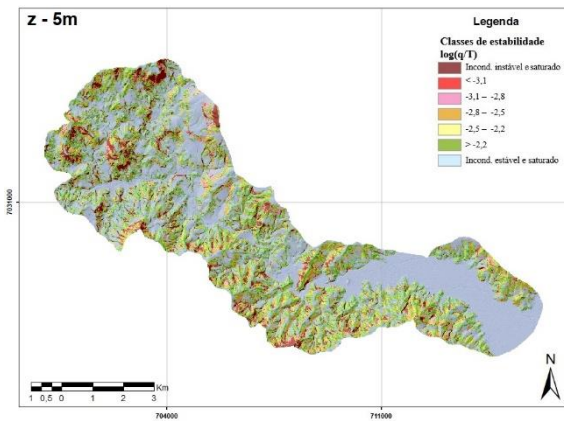
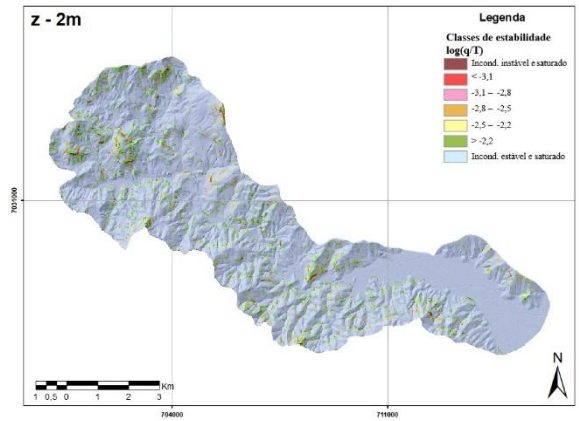
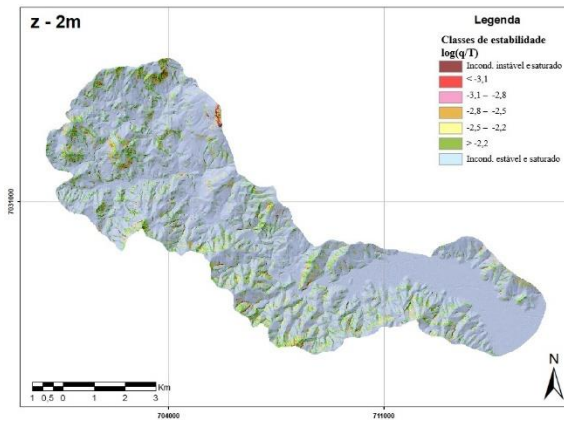


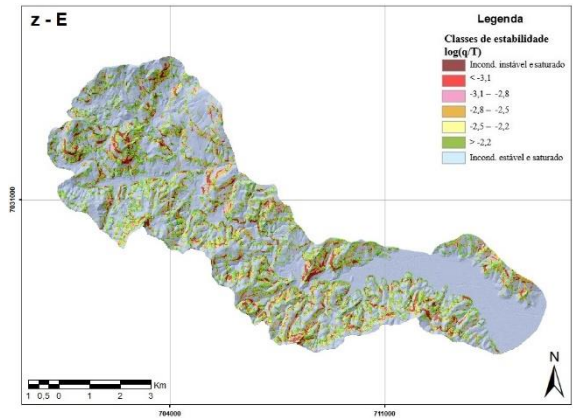
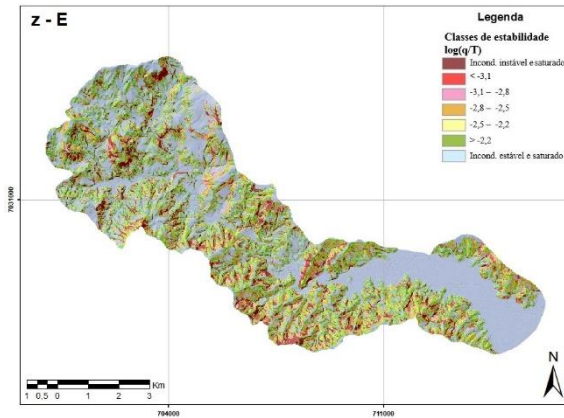
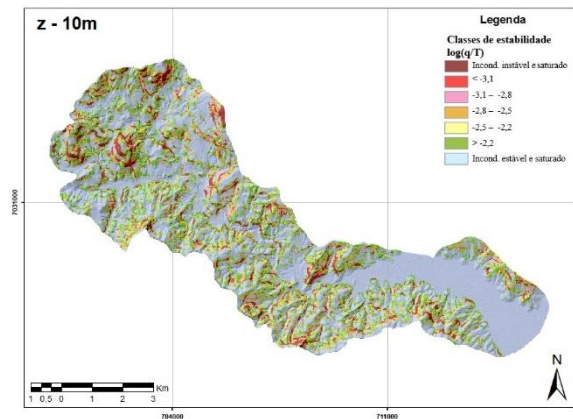
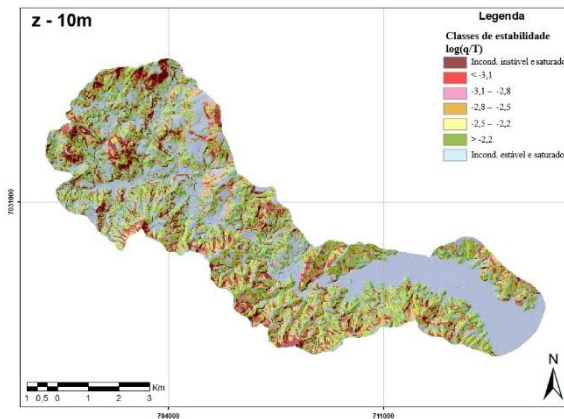
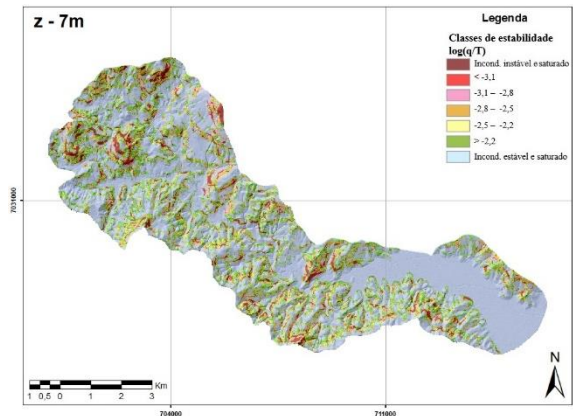
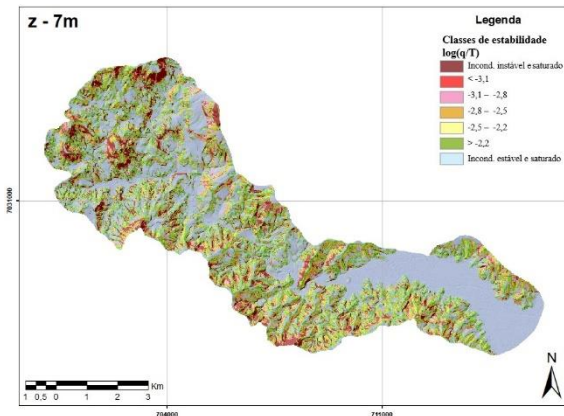


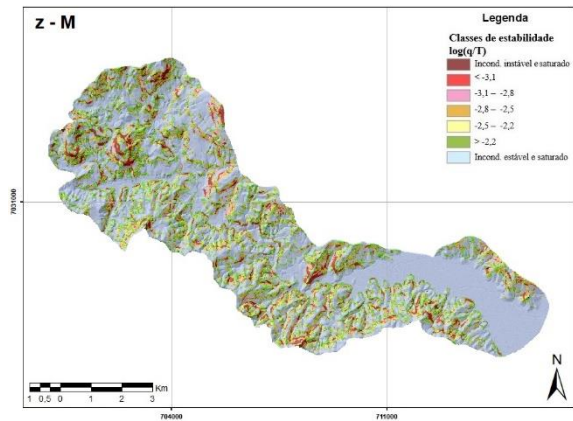
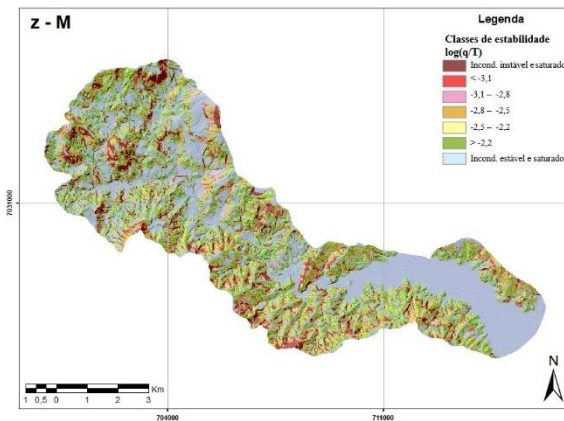
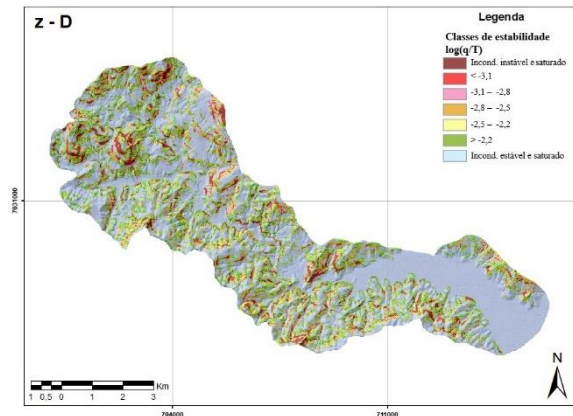
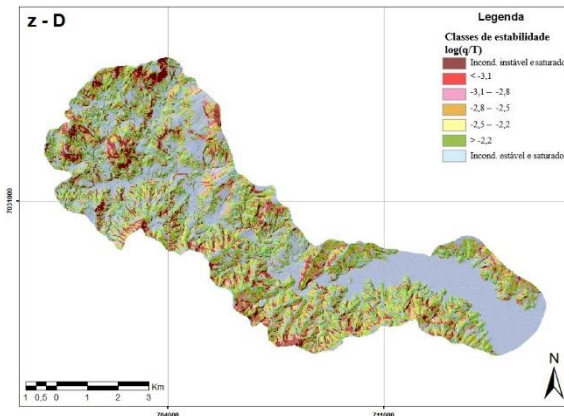
CENÁRIO N

1m

10m



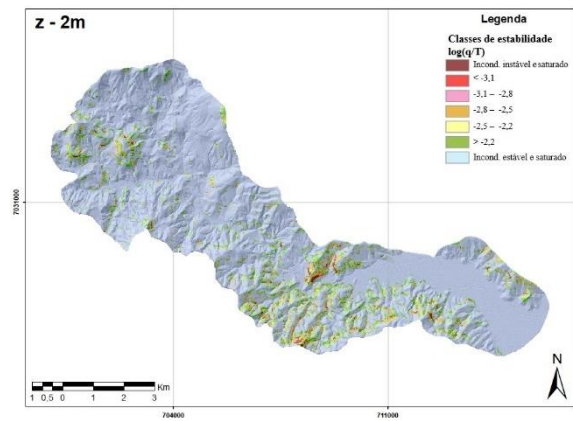
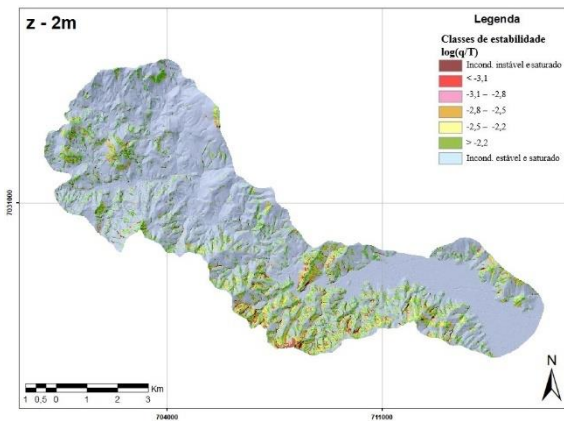


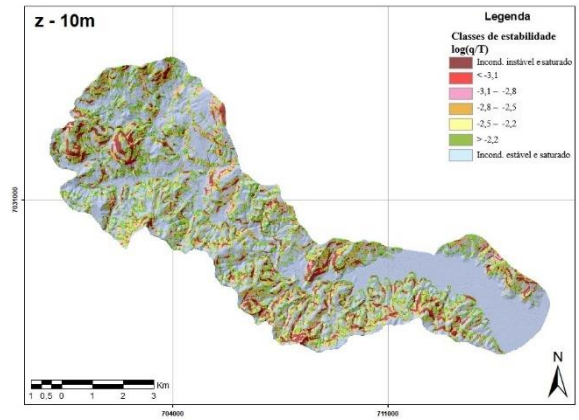
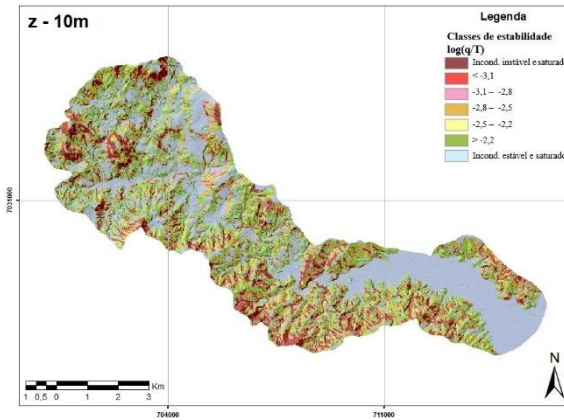
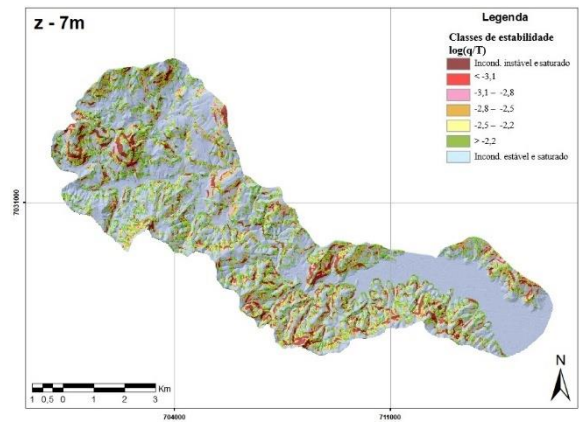
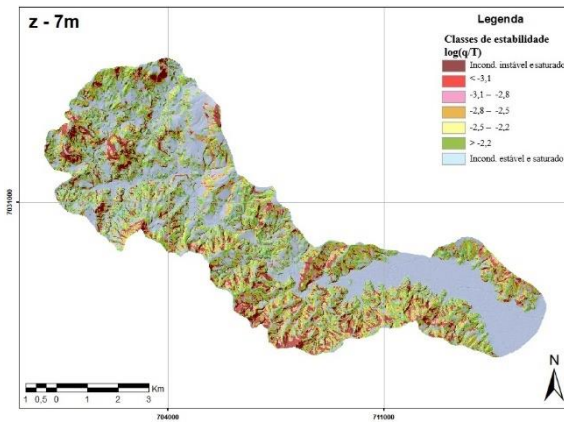
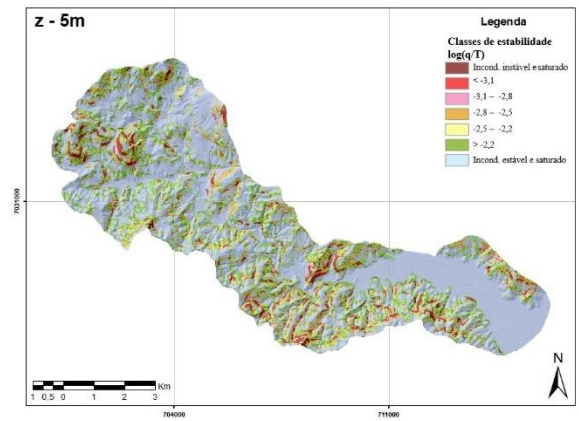
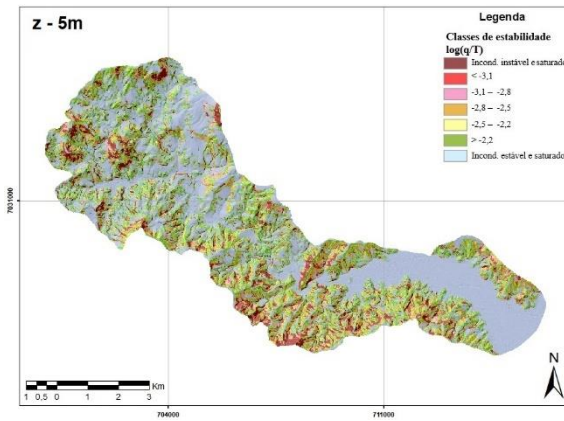


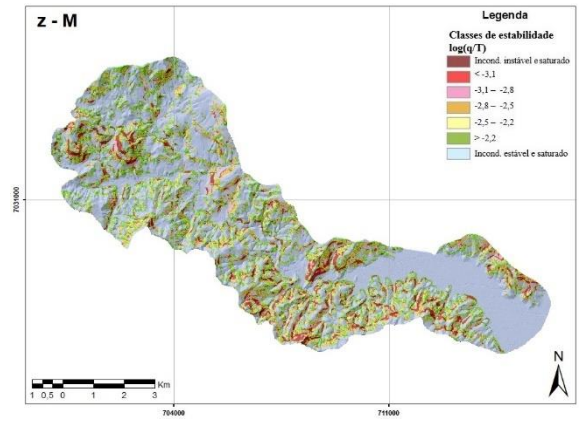
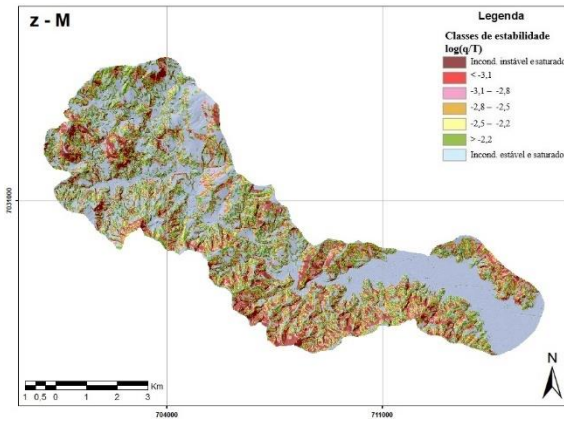
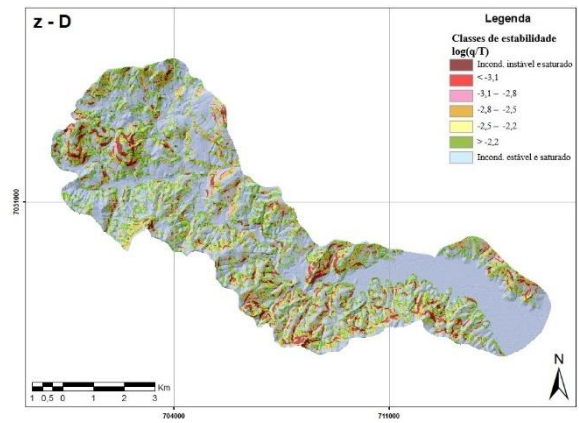
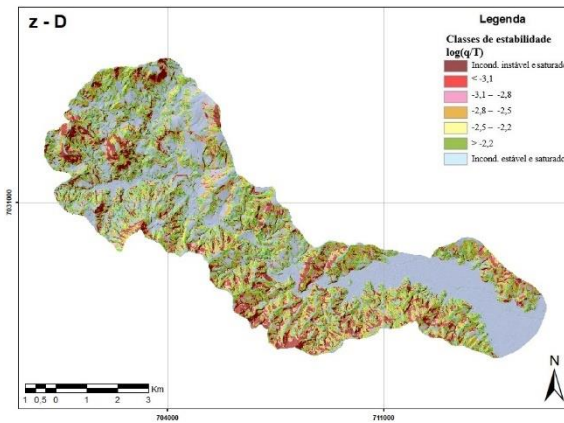
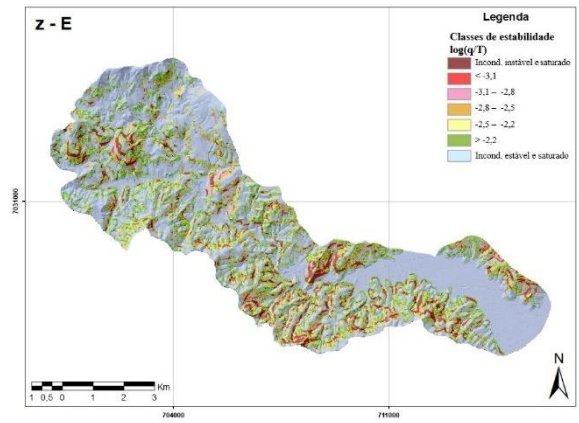
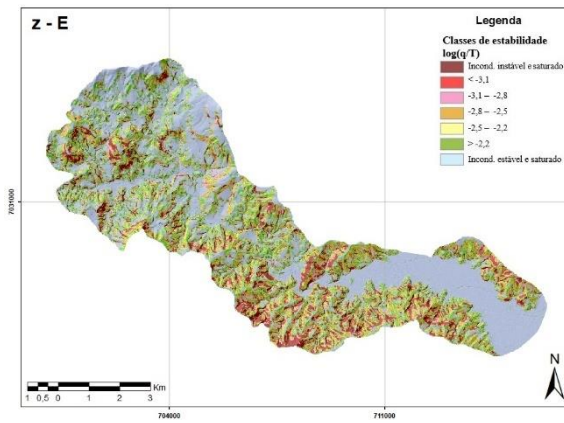
CENÁRIO O

1m

10m







<i>Incond. Estável</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Classe de estabilidade	CENÁRIO F								
SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	
<i>Incond. Instável</i>	49,2	49,2	83,9	83,9	34,3	34,3	51,8	51,8	
< -3,1	5,4	54,6	4,0	87,8	5,0	39,3	5,3	57,1	
-3,1 - -2,8	3,6	58,2	1,9	89,7	4,0	43,3	4,2	61,3	
-2,8 - -2,5	4,3	62,4	2,1	91,8	5,3	48,6	6,0	67,2	
-2,5 - -2,2	4,0	66,4	1,7	93,6	5,1	53,7	5,5	72,8	
> -2,2	7,6	74,0	3,6	97,1	9,4	63,1	8,5	81,2	
<i>Incond. Estável</i>	26,0	100,0	2,9	100,0	36,9	100,0	18,8	100,0	
Classe de estabilidade	CENÁRIO G								
SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	
<i>Incond. Instável</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
< -3,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
-3,1 - -2,8	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
-2,8 - -2,5	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	
-2,5 - -2,2	0,4	0,6	0,5	0,9	0,2	0,3	0,1	0,2	
> -2,2	1,9	2,5	4,0	4,8	0,7	1,0	0,7	0,9	
<i>Incond. Estável</i>	97,5	100,0	95,2	100,0	99,0	100,0	99,1	100,0	
Classe de estabilidade	CENÁRIO H								
SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	
<i>Incond. Instável</i>	0,8	0,8	1,5	1,5	0,2	0,2	0,1	0,1	
< -3,1	0,4	1,2	0,9	2,4	0,3	0,5	0,3	0,4	
-3,1 - -2,8	0,5	1,8	0,9	3,3	0,4	0,9	0,4	0,8	
-2,8 - -2,5	1,6	3,4	2,4	5,7	1,3	2,2	1,4	2,2	
-2,5 - -2,2	3,1	6,5	5,2	10,9	1,9	4,1	1,8	3,9	
> -2,2	8,9	15,4	15,7	26,6	4,7	8,8	5,2	9,1	
<i>Incond. Estável</i>	84,6	100,0	73,4	100,0	91,2	100,0	90,9	100,0	
Classe de estabilidade	CENÁRIO I								
SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	
<i>Incond. Instável</i>	0,3	0,3	1,3	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
< -3,1	0,2	0,5	0,9	2,1	0,1	0,1	0,4	0,4	
-3,1 - -2,8	0,2	0,8	0,8	3,0	0,2	0,3	0,4	0,8	
-2,8 - -2,5	0,9	1,6	2,4	5,4	0,6	0,9	1,1	1,9	
-2,5 - -2,2	2,0	3,6	5,2	10,6	1,3	2,3	1,8	3,7	
> -2,2	7,4	11,0	18,6	29,1	3,8	6,1	5,9	9,6	
<i>Incond. Estável</i>	89,0	100,0	70,9	100,0	93,9	100,0	90,4	100,0	
Classe de estabilidade	CENÁRIO J								
SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	
<i>Incond. Instável</i>	0,8	0,8	1,8	1,8	0,2	0,2	0,2	0,2	
< -3,1	0,4	1,3	1,2	3,0	0,3	0,5	0,3	0,5	
-3,1 - -2,8	0,6	1,9	1,1	4,1	0,4	0,9	0,4	1,0	
-2,8 - -2,5	1,8	3,6	3,3	7,4	1,4	2,3	1,8	2,8	
-2,5 - -2,2	3,5	7,1	6,6	14,0	2,1	4,4	2,0	4,8	
> -2,2	10,0	17,2	19,5	33,5	5,4	9,8	6,8	11,5	
<i>Incond. Estável</i>	82,8	100,0	66,5	100,0	90,2	100,0	88,5	100,0	
Classe de estabilidade	CENÁRIO K								
SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	
<i>Incond. Instável</i>	0,9	0,9	2,5	2,5	0,2	0,2	0,3	0,3	

< -3,1	0,5	1,4	1,5	4,0	0,3	0,4	0,5	0,7
-3,1 - -2,8	0,7	2,1	1,2	5,1	0,3	0,7	0,6	1,3
-2,8 - -2,5	1,8	3,9	3,1	8,3	0,9	1,6	1,2	2,5
-2,5 - -2,2	3,2	7,1	5,8	14,1	1,5	3,1	2,2	4,8
>- 2,2	8,9	16,0	15,5	29,6	4,3	7,4	6,2	10,9
<i>Incond. Estável</i>	84,0	100,0	70,4	100,0	92,6	100,0	89,1	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO L							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
< -3,1	0,2	0,2	0,9	0,9	0,3	0,3	0,4	0,4
-3,1 - -2,8	0,4	0,6	0,8	1,7	0,5	0,7	0,6	1,0
-2,8 - -2,5	1,8	2,4	2,8	4,5	1,6	2,3	2,5	3,5
-2,5 - -2,2	3,3	5,7	6,1	10,6	2,4	4,7	3,9	7,4
>- 2,2	8,9	14,6	17,0	27,6	6,1	10,8	9,8	17,2
<i>Incond. Estável</i>	85,4	100,0	72,4	100,0	89,2	100,0	82,8	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO M							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	1,0	1,0	3,9	3,9	0,2	0,2	0,2	0,2
< -3,1	0,5	1,5	2,0	5,9	0,3	0,4	0,4	0,6
-3,1 - -2,8	0,7	2,3	1,9	7,8	0,3	0,7	0,3	0,9
-2,8 - -2,5	2,2	4,5	5,1	12,8	1,1	1,8	1,1	2,0
-2,5 - -2,2	3,9	8,4	8,7	21,6	1,8	3,6	2,6	4,6
>- 2,2	10,7	19,1	22,5	44,0	4,5	8,0	6,3	10,9
<i>Incond. Estável</i>	80,9	100,0	56,0	100,0	92,0	100,0	89,1	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO N							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,6	0,6	1,7	1,7	0,3	0,3	0,6	0,6
< -3,1	0,3	1,0	0,9	2,6	0,3	0,6	0,8	1,4
-3,1 - -2,8	0,5	1,5	1,0	3,6	0,5	1,1	0,8	2,2
-2,8 - -2,5	1,7	3,2	3,0	6,7	1,3	2,4	1,7	3,9
-2,5 - -2,2	3,0	6,2	5,8	12,5	2,1	4,5	3,1	7,0
>- 2,2	9,1	15,3	19,5	32,1	5,5	10,0	9,1	16,1
<i>Incond. Estável</i>	84,7	100,0	67,9	100,0	90,0	100,0	83,9	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO O							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	1,1	1,1	2,7	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3
< -3,1	0,6	1,8	1,7	4,3	0,5	0,8	0,8	1,1
-3,1 - -2,8	0,8	2,5	1,7	6,0	0,7	1,5	0,7	1,8
-2,8 - -2,5	2,5	5,0	4,8	10,8	1,8	3,2	2,3	4,1
-2,5 - -2,2	4,3	9,3	8,0	18,8	2,6	5,8	3,5	7,6
>- 2,2	11,6	21,0	21,6	40,4	6,5	12,4	8,0	15,6
<i>Incond. Estável</i>	79,0	100,0	59,6	100,0	87,6	100,0	84,4	100,0

PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 5m

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO A							
	Resolução espacial 1m				Resolução espacial 10m			
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	1,5	1,5	5,2	5,2	0,4	0,4	0,8	0,8
< -3,1	0,8	2,3	3,1	8,3	0,7	1,1	1,6	2,4

-3,1 - -2,8	1,2	3,5	3,3	11,6	0,9	2,0	1,4	3,8
-2,8 - -2,5	3,6	7,1	7,2	18,8	2,7	4,8	3,6	7,4
-2,5 - -2,2	6,3	13,4	13,0	31,7	4,0	8,8	6,2	13,6
>- 2,2	16,6	30,0	31,1	62,8	10,2	19,0	16,4	30,0
<i>Incond. Estável</i>	70,0	100,0	37,2	100,0	81,0	100,0	70,0	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	6,1	6,1	18,7	18,7	2,7	2,7	4,6	4,6
< -3,1	2,4	8,5	6,2	24,9	2,2	4,9	3,6	8,2
-3,1 - -2,8	3,4	11,9	5,7	30,6	2,7	7,5	3,6	11,9
-2,8 - -2,5	7,4	19,3	11,6	42,3	5,3	12,9	7,5	19,4
-2,5 - -2,2	9,5	28,8	14,0	56,2	6,3	19,2	10,1	29,5
>- 2,2	19,9	48,7	27,1	83,3	14,5	33,6	21,5	51,0
<i>Incond. Estável</i>	51,3	100,0	16,7	100,0	66,4	100,0	49,0	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	5,8	5,8	17,4	17,4	2,4	2,4	4,3	4,3
< -3,1	2,4	8,1	6,0	23,4	2,0	4,4	3,3	7,6
-3,1 - -2,8	3,4	11,5	5,5	28,9	2,5	6,9	3,4	11,0
-2,8 - -2,5	3,4	14,8	11,5	40,4	5,2	12,1	7,2	18,2
-2,5 - -2,2	9,7	24,6	14,2	54,6	6,2	18,3	9,9	28,1
>- 2,2	20,7	45,3	27,7	82,3	14,3	32,5	21,4	49,5
<i>Incond. Estável</i>	54,7	100,0	17,7	100,0	67,5	100,0	50,5	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	5,6	5,6	17,4	17,4	2,4	2,4	4,3	4,3
< -3,1	2,2	7,8	5,9	23,3	1,9	4,3	3,3	7,5
-3,1 - -2,8	3,1	10,9	5,3	28,7	2,5	6,8	3,2	10,8
-2,8 - -2,5	6,9	17,8	11,2	39,9	5,0	11,8	7,0	18,8
-2,5 - -2,2	9,1	26,9	14,0	53,9	6,0	17,8	9,7	27,5
>- 2,2	19,5	46,4	27,5	81,4	13,9	31,7	20,9	48,3
<i>Incond. Estável</i>	53,6	100,0	18,6	100,0	68,3	100,0	51,7	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
< -3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-3,1 - -2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-2,8 - -2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-2,5 - -2,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
>- 2,2	0,5	0,6	1,7	1,8	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Incond. Estável</i>	99,4	100,0	98,2	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	57,3	57,3	89,4	89,4	42,0	42,0	60,0	60,0
< -3,1	5,1	62,4	2,9	92,4	5,6	47,6	5,9	65,9
-3,1 - -2,8	3,1	65,5	1,3	93,7	4,1	51,8	4,4	70,3
-2,8 - -2,5	3,5	69,0	1,6	95,3	5,3	57,0	5,4	75,7
-2,5 - -2,2	3,1	72,1	1,0	96,3	4,8	61,9	4,8	80,4
>- 2,2	6,4	78,5	2,3	98,6	8,4	70,2	7,2	87,7
<i>Incond. Estável</i>	21,5	100,0	1,4	100,0	29,8	100,0	12,3	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO G							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	2,2	2,2	6,6	6,6	0,7	0,7	1,2	1,2
< -3,1	1,2	3,3	3,8	10,4	0,9	1,6	1,9	3,1
-3,1 - -2,8	1,6	4,9	3,8	14,2	1,3	2,9	1,5	4,6
-2,8 - -2,5	4,6	9,5	8,0	22,2	3,4	6,3	4,4	8,9
-2,5 - -2,2	7,3	16,8	13,2	35,5	4,6	10,9	6,6	15,5
> -2,2	17,7	34,4	31,0	66,4	11,1	21,9	17,3	32,9
<i>Incond. Estável</i>	65,6	100,0	33,6	100,0	78,1	100,0	67,1	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO H							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	6,2	6,2	14,8	14,8	2,9	2,9	3,7	3,7
< -3,1	2,5	8,7	6,1	21,0	2,1	5,1	3,0	6,7
-3,1 - -2,8	3,6	12,3	6,1	27,1	2,6	7,7	2,9	9,6
-2,8 - -2,5	7,3	19,5	11,0	38,1	5,2	12,8	6,9	16,6
-2,5 - -2,2	9,0	28,5	13,3	51,4	6,1	18,9	9,1	25,7
> -2,2	18,6	47,1	27,3	78,7	13,7	32,6	20,4	46,1
<i>Incond. Estável</i>	52,9	100,0	21,3	100,0	67,4	100,0	53,9	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO I							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	5,4	5,4	16,3	16,3	2,4	2,4	4,0	4,0
< -3,1	2,2	7,6	5,9	22,3	1,9	4,3	3,3	7,3
-3,1 - -2,8	3,1	10,7	5,4	27,7	2,4	6,7	3,1	10,3
-2,8 - -2,5	7,0	17,7	10,7	38,4	5,0	11,7	7,1	17,4
-2,5 - -2,2	9,2	26,9	14,5	52,9	5,9	17,6	9,5	26,9
> -2,2	19,3	46,2	27,6	80,6	13,5	31,1	20,0	46,9
<i>Incond. Estável</i>	53,8	100,0	19,4	100,0	68,9	100,0	53,1	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO J							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	6,7	6,7	16,9	16,9	3,2	3,2	4,3	4,3
< -3,1	2,6	9,3	6,5	23,4	2,2	5,4	3,2	7,5
-3,1 - -2,8	3,7	13,0	5,9	29,3	2,7	8,1	3,0	10,5
-2,8 - -2,5	7,4	20,4	11,1	40,4	5,3	13,4	7,3	17,8
-2,5 - -2,2	9,1	29,5	13,1	53,4	6,1	19,5	9,0	26,8
> -2,2	18,6	48,1	26,4	79,8	13,8	33,3	20,6	47,4
<i>Incond. Estável</i>	51,9	100,0	20,2	100,0	66,7	100,0	52,6	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO K							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	5,5	5,5	15,5	15,5	2,2	2,2	3,2	3,2
< -3,1	2,4	7,8	5,6	21,1	1,8	3,9	3,0	6,3
-3,1 - -2,8	3,3	11,1	5,4	26,5	2,2	6,2	3,2	9,5
-2,8 - -2,5	6,8	17,9	10,8	37,3	4,5	10,7	6,3	15,8
-2,5 - -2,2	8,8	26,7	12,8	50,1	5,7	16,4	8,5	24,3
> -2,2	19,0	45,7	26,2	76,3	13,2	29,5	18,4	42,6
<i>Incond. Estável</i>	54,3	100,0	23,7	100,0	70,5	100,0	57,4	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO L							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	1,6	1,6	4,4	4,4	2,7	2,7	4,8	4,8
< -3,1	4,2	5,8	9,4	13,8	3,4	6,1	5,5	10,3

-3,1 -- -2,8	4,5	10,4	7,7	21,5	3,2	9,2	4,3	14,7
-2,8 -- -2,5	7,8	18,2	12,7	34,2	5,0	14,2	7,2	21,9
-2,5 -- -2,2	9,9	28,1	15,8	50,0	5,3	19,5	8,2	30,1
> -2,2	21,3	49,4	33,8	83,9	11,1	30,7	17,0	47,0
<i>Incond. Estável</i>	50,6	100,0	16,1	100,0	69,3	100,0	53,0	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO M							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,7	7,7	21,8	21,8	3,0	3,0	4,1	4,1
< -3,1	2,9	10,6	7,3	29,1	2,2	5,2	3,6	7,6
-3,1 -- -2,8	3,7	14,3	6,3	35,4	2,7	7,9	3,9	11,5
-2,8 -- -2,5	7,2	21,5	10,8	46,2	5,2	13,1	7,3	18,8
-2,5 -- -2,2	8,8	30,3	12,0	58,2	6,1	19,2	8,4	27,2
> -2,2	18,4	48,7	23,9	82,1	14,1	33,3	21,3	48,6
<i>Incond. Estável</i>	51,3	100,0	17,9	100,0	66,7	100,0	51,4	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO N							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	6,4	6,4	18,6	18,6	2,9	2,9	4,8	4,8
< -3,1	2,6	9,0	6,3	24,8	2,1	5,0	3,4	8,2
-3,1 -- -2,8	3,7	12,7	5,6	30,4	2,5	7,5	3,3	11,5
-2,8 -- -2,5	7,5	20,2	11,2	41,6	5,1	12,6	7,6	19,1
-2,5 -- -2,2	9,5	29,6	13,7	55,3	6,3	18,8	10,2	29,3
> -2,2	19,8	49,4	26,9	82,2	14,2	33,1	20,9	50,2
<i>Incond. Estável</i>	50,6	100,0	17,8	100,0	66,9	100,0	49,8	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO O							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,8	7,8	20,9	20,9	4,0	4,0	5,7	5,7
< -3,1	3,0	10,8	6,9	27,8	2,5	6,5	4,3	10,0
-3,1 -- -2,8	4,1	15,0	6,2	34,0	3,0	9,5	4,2	14,2
-2,8 -- -2,5	7,9	22,8	11,1	45,1	5,6	15,1	7,9	22,1
-2,5 -- -2,2	9,5	32,3	13,0	58,1	6,6	21,7	9,3	31,4
> -2,2	19,3	51,6	25,7	83,8	14,9	36,6	21,3	52,7
<i>Incond. Estável</i>	48,4	100,0	16,2	100,0	63,4	100,0	47,3	100,0

PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 7m

Classe de estabilidade SHALSTAB	Resolução espacial 1m				Resolução espacial 10m			
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	2,9	2,9	9,8	9,8	1,0	1,0	2,2	2,2
< -3,1	1,5	4,4	5,0	14,8	1,3	2,3	2,3	4,5
-3,1 -- -2,8	2,2	6,6	4,6	19,5	1,8	4,1	2,3	6,8
-2,8 -- -2,5	5,8	12,4	10,0	29,5	4,3	8,4	6,0	12,8
-2,5 -- -2,2	8,7	21,1	15,0	44,5	5,6	13,9	8,8	21,6
> -2,2	20,0	41,1	31,6	76,0	13,4	27,3	20,6	42,2
<i>Incond. Estável</i>	58,9	100,0	24,0	100,0	72,7	100,0	57,8	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO B							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,7	8,7	24,9	24,9	4,4	4,4	7,2	7,2
< -3,1	3,3	12,0	7,6	32,4	2,9	7,3	4,8	11,9
-3,1 -- -2,8	4,6	16,6	6,8	39,2	3,4	10,8	4,8	16,8

-2,8 -- 2,5	8,5	25,1	12,0	51,2	6,2	17,0	8,6	25,4
-2,5 -- 2,2	10,2	35,3	13,1	64,3	7,1	24,1	10,1	35,5
> - 2,2	20,1	55,4	23,8	88,1	15,8	39,9	22,1	57,7
<i>Incond. Estável</i>	44,6	100,0	11,9	100,0	60,1	100,0	42,3	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO C							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,1	8,1	23,5	23,5	4,0	4,0	6,6	6,6
< -3,1	3,2	11,2	7,3	30,8	2,8	6,8	4,6	11,2
-3,1 -- 2,8	4,4	15,6	6,7	37,5	3,3	10,1	4,7	15,9
-2,8 -- 2,5	8,4	24,0	12,0	49,5	6,1	16,2	8,4	24,4
-2,5 -- 2,2	10,1	34,2	13,3	62,9	7,0	23,2	10,2	34,5
> - 2,2	20,3	54,5	24,6	87,5	15,7	38,9	22,1	56,6
<i>Incond. Estável</i>	45,5	100,0	12,5	100,0	61,1	100,0	43,4	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO D							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,0	8,0	23,3	23,3	3,9	3,9	6,5	6,5
< -3,1	3,0	11,0	7,1	30,4	2,7	6,6	4,5	10,9
-3,1 -- 2,8	4,2	15,2	6,5	36,9	3,2	9,8	4,6	15,5
-2,8 -- 2,5	8,1	23,4	11,9	48,7	5,9	15,7	8,2	23,7
-2,5 -- 2,2	9,9	33,3	13,3	62,0	6,8	22,5	10,2	33,8
> - 2,2	20,0	53,2	24,7	86,7	15,3	37,8	21,7	55,5
<i>Incond. Estável</i>	46,8	100,0	13,3	100,0	62,2	100,0	44,5	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO E							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
< -3,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1
-3,1 -- 2,8	0,1	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,2	0,3
-2,8 -- 2,5	0,2	0,3	0,8	1,3	0,1	0,1	0,3	0,6
-2,5 -- 2,2	0,8	1,2	2,1	3,4	0,4	0,5	0,7	1,3
> - 2,2	4,1	5,3	13,1	16,5	1,6	2,1	2,6	3,9
<i>Incond. Estável</i>	94,7	100,0	83,5	100,0	97,8	100,0	96,1	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO F							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	58,7	58,7	90,3	90,3	43,5	43,5	61,3	61,3
< -3,1	5,0	63,7	2,7	93,0	5,7	49,2	6,4	67,6
-3,1 -- 2,8	3,0	66,7	1,3	94,3	4,2	53,4	4,0	71,7
-2,8 -- 2,5	3,4	70,1	1,5	95,8	5,2	58,6	5,4	77,1
-2,5 -- 2,2	3,0	73,1	0,9	96,6	4,7	63,3	4,5	81,5
> - 2,2	6,2	79,3	2,1	98,8	8,2	71,5	7,0	88,5
<i>Incond. Estável</i>	20,7	100,0	1,2	100,0	28,5	100,0	11,5	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO G							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	3,9	3,9	11,7	11,7	1,5	1,5	2,6	2,6
< -3,1	1,9	5,8	5,7	17,4	1,5	3,1	2,6	5,2
-3,1 -- 2,8	2,7	8,4	5,0	22,5	2,2	5,2	3,0	8,2
-2,8 -- 2,5	6,5	15,0	10,5	33,0	4,8	10,0	6,2	14,4
-2,5 -- 2,2	9,1	24,1	14,8	47,8	5,9	15,9	9,5	23,9
> - 2,2	20,1	44,2	30,5	78,4	13,8	29,7	21,4	45,3
<i>Incond. Estável</i>	55,8	100,0	21,6	100,0	70,3	100,0	54,7	100,0
Classe de	CENÁRIO H							

estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,7	8,7	21,4	21,4	4,5	4,5	5,7	5,7
< -3,1	3,4	12,2	7,7	29,1	2,8	7,3	4,1	9,9
-3,1 - -2,8	4,6	16,7	6,8	35,9	3,3	10,6	4,5	14,3
-2,8 - -2,5	8,2	25,0	11,4	47,3	6,1	16,7	8,8	23,1
-2,5 - -2,2	9,6	34,6	12,7	60,1	6,9	23,5	9,3	32,4
> -2,2	19,0	53,6	24,7	84,8	15,2	38,8	21,8	54,2
<i>Incond. Estável</i>	46,4	100,0	15,2	100,0	61,2	100,0	45,8	100,0
CENÁRIO I								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,8	7,8	22,2	22,2	3,9	3,9	6,3	6,3
< -3,1	3,0	10,9	7,1	29,3	2,7	6,6	4,3	10,7
-3,1 - -2,8	4,3	15,1	6,4	35,7	3,1	9,7	4,1	14,8
-2,8 - -2,5	8,1	23,2	11,7	47,4	5,8	15,6	8,4	23,2
-2,5 - -2,2	9,8	33,1	13,5	60,9	6,7	22,3	10,0	33,2
> -2,2	19,7	52,7	25,1	86,0	15,0	37,2	21,3	54,5
<i>Incond. Estável</i>	47,3	100,0	14,0	100,0	62,8	100,0	45,5	100,0
CENÁRIO J								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,2	9,2	23,3	23,3	4,7	4,7	6,3	6,3
< -3,1	3,5	12,7	7,5	30,7	2,9	7,6	4,1	10,5
-3,1 - -2,8	4,6	17,4	6,7	37,5	3,4	11,0	4,5	15,0
-2,8 - -2,5	8,2	25,6	11,4	48,9	6,1	17,1	9,0	24,0
-2,5 - -2,2	9,6	35,2	12,3	61,2	6,9	24,0	9,3	33,3
> -2,2	18,8	54,0	23,9	85,1	15,2	39,2	21,7	54,9
<i>Incond. Estável</i>	46,0	100,0	14,9	100,0	60,8	100,0	45,1	100,0
CENÁRIO K								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,7	7,7	21,0	21,0	3,5	3,5	5,2	5,2
< -3,1	3,2	10,9	7,3	28,3	2,4	5,8	3,9	9,2
-3,1 - -2,8	4,2	15,1	6,7	35,1	2,9	8,7	4,3	13,5
-2,8 - -2,5	8,0	23,1	11,1	46,2	5,4	14,2	7,5	21,0
-2,5 - -2,2	9,7	32,7	12,3	58,5	6,6	20,7	9,1	30,1
> -2,2	19,8	52,6	24,8	83,3	14,7	35,4	19,4	49,6
<i>Incond. Estável</i>	47,4	100,0	16,7	100,0	64,6	100,0	50,4	100,0
CENÁRIO L								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	5,6	5,6	13,5	13,5	5,6	5,6	9,2	9,2
< -3,1	5,3	10,9	10,7	24,1	4,1	9,8	6,7	15,9
-3,1 - -2,8	5,3	16,1	8,3	32,5	3,5	13,3	4,9	20,8
-2,8 - -2,5	9,0	25,1	13,3	45,7	5,5	18,7	7,7	28,5
-2,5 - -2,2	10,6	35,7	14,8	60,6	6,0	24,7	8,4	36,9
> -2,2	21,1	56,8	28,4	89,0	13,0	37,7	18,5	55,4
<i>Incond. Estável</i>	43,2	100,0	11,0	100,0	62,3	100,0	44,6	100,0
CENÁRIO M								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,5	10,5	28,5	28,5	4,6	4,6	6,5	6,5
< -3,1	3,8	14,3	8,3	36,7	2,9	7,6	4,9	11,4
-3,1 - -2,8	4,5	18,8	6,9	43,6	3,5	11,1	4,6	16,0

-2,8 -- -2,5	8,1	26,9	10,9	54,5	6,1	17,2	8,6	24,6
-2,5 -- -2,2	9,3	36,2	11,6	66,1	6,9	24,1	9,7	34,4
> -2,2	18,9	55,1	21,5	87,6	15,6	39,7	22,5	56,8
<i>Incond. Estável</i>	44,9	100,0	12,4	100,0	60,3	100,0	43,2	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO N							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,0	9,0	24,8	24,8	4,2	4,2	6,9	6,9
< -3,1	3,5	12,5	7,4	32,2	2,7	6,9	4,3	11,1
-3,1 -- -2,8	4,7	17,2	6,8	38,9	3,2	10,1	4,6	15,8
-2,8 -- -2,5	8,6	25,8	11,7	50,7	6,0	16,1	8,8	24,6
-2,5 -- -2,2	10,0	35,9	12,9	63,6	7,1	23,2	10,4	35,0
> -2,2	20,0	55,8	23,9	87,5	15,7	38,9	22,6	57,5
<i>Incond. Estável</i>	44,2	100,0	12,5	100,0	61,1	100,0	42,5	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO O							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,4	10,4	27,1	27,1	5,7	5,7	8,7	8,7
< -3,1	3,9	14,3	7,8	34,9	3,2	8,9	5,3	14,0
-3,1 -- -2,8	5,1	19,4	7,1	42,0	3,7	12,6	5,0	19,1
-2,8 -- -2,5	8,6	28,1	11,4	53,4	6,4	19,0	8,9	27,9
-2,5 -- -2,2	9,8	37,9	12,0	65,4	7,3	26,2	9,8	37,8
> -2,2	19,3	57,2	22,9	88,3	16,0	42,2	22,1	59,9
<i>Incond. Estável</i>	42,8	100,0	11,7	100,0	57,8	100,0	40,1	100,0

PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 10m								
<i>Resolução espacial 1m</i>				<i>Resolução espacial 10m</i>				
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO A							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	4,6	4,6	14,9	14,9	1,8	1,8	3,4	3,4
< -3,1	2,2	6,8	6,2	21,1	1,9	3,8	3,4	6,8
-3,1 -- -2,8	3,3	10,1	5,6	26,7	2,6	6,4	3,3	10,2
-2,8 -- -2,5	7,5	17,6	11,9	38,6	5,5	11,9	7,7	17,8
-2,5 -- -2,2	10,0	27,6	15,2	53,8	6,6	18,5	10,4	28,3
> -2,2	21,5	49,0	29,8	83,6	15,5	34,0	23,1	51,3
<i>Incond. Estável</i>	51,0	100,0	16,4	100,0	66,0	100,0	48,7	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO B							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	11,1	11,1	30,1	30,1	6,1	6,1	10,1	10,1
< -3,1	4,2	15,3	8,6	38,7	3,5	9,6	5,2	15,3
-3,1 -- -2,8	5,4	20,7	7,4	46,1	4,1	13,7	5,9	21,2
-2,8 -- -2,5	9,1	29,8	11,9	58,0	6,8	20,5	9,5	30,7
-2,5 -- -2,2	10,3	40,2	11,8	69,8	7,6	28,1	10,1	40,8
> -2,2	19,8	59,9	21,1	90,9	16,6	44,7	21,9	62,7
<i>Incond. Estável</i>	40,1	100,0	9,1	100,0	55,3	100,0	37,3	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO C							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,4	10,4	28,7	28,7	5,7	5,7	9,3	9,3
< -3,1	4,0	14,4	8,4	37,1	3,4	9,0	5,2	14,5
-3,1 -- -2,8	5,3	19,7	7,4	44,4	4,0	13,0	5,8	20,3
-2,8 -- -2,5	9,1	28,8	12,0	56,5	6,7	19,7	9,2	29,5

-2,5 -- 2,2	10,4	39,2	12,2	68,7	7,6	27,3	10,4	39,8
>- 2,2	20,0	59,2	21,8	90,5	16,6	43,8	22,0	61,9
<i>Incond. Estável</i>	40,8	100,0	9,5	100,0	56,2	100,0	38,1	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO D							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,2	10,2	28,2	28,2	5,5	5,5	9,0	9,0
< -3,1	3,8	14,0	8,1	36,3	3,2	8,7	5,1	14,1
-3,1 -- -2,8	5,1	19,1	7,1	43,5	3,8	12,5	5,7	19,8
-2,8 -- -2,5	8,8	27,9	11,9	55,4	6,5	19,0	8,7	28,5
-2,5 -- 2,2	10,2	38,1	12,3	67,6	7,3	26,3	10,2	38,7
>- 2,2	19,8	57,9	22,1	89,7	16,1	42,5	21,7	60,4
<i>Incond. Estável</i>	42,1	100,0	10,3	100,0	57,5	100,0	39,6	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO E							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,1	0,1	0,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
< -3,1	0,2	0,3	0,9	1,2	0,2	0,2	0,4	0,4
-3,1 -- -2,8	0,2	0,5	0,8	2,0	0,2	0,4	0,4	0,8
-2,8 -- -2,5	1,0	1,6	2,8	4,8	0,8	1,2	1,6	2,4
-2,5 -- 2,2	2,7	4,2	6,3	11,1	1,8	3,0	2,5	4,9
>- 2,2	10,5	14,8	26,1	37,3	5,5	8,5	8,7	13,6
<i>Incond. Estável</i>	85,2	100,0	62,7	100,0	91,4	100,0	86,4	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO F							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	59,7	59,7	90,9	90,9	44,6	44,6	62,6	62,6
< -3,1	5,0	64,7	2,6	93,5	5,8	50,4	6,3	68,9
-3,1 -- -2,8	2,9	67,6	1,3	94,8	4,2	54,6	4,0	72,9
-2,8 -- -2,5	3,3	70,9	1,3	96,1	5,2	59,8	5,5	78,4
-2,5 -- 2,2	2,9	73,8	0,8	96,9	4,6	64,4	4,2	82,6
>- 2,2	6,0	79,8	2,0	98,9	8,0	72,4	6,7	89,3
<i>Incond. Estável</i>	20,2	100,0	1,1	100,0	27,6	100,0	10,7	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO G							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	5,8	5,8	17,2	17,2	2,6	2,6	4,1	4,1
< -3,1	2,6	8,4	6,8	24,0	2,2	4,8	3,8	8,0
-3,1 -- -2,8	3,7	12,1	5,9	29,9	2,9	7,7	3,6	11,6
-2,8 -- -2,5	8,0	20,1	12,1	41,9	5,8	13,5	7,7	19,3
-2,5 -- 2,2	10,1	30,2	14,9	56,8	6,8	20,3	10,9	30,2
>- 2,2	21,1	51,3	28,3	85,1	15,6	35,9	23,3	53,5
<i>Incond. Estável</i>	48,7	100,0	14,9	100,0	64,1	100,0	46,5	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO H							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	11,1	11,1	27,2	27,2	6,0	6,0	8,1	8,1
< -3,1	4,2	15,3	8,5	35,8	3,4	9,4	4,9	13,0
-3,1 -- -2,8	5,3	20,6	7,4	43,1	3,9	13,3	5,3	18,4
-2,8 -- -2,5	8,8	29,4	11,3	54,4	6,7	20,0	9,8	28,2
-2,5 -- 2,2	9,8	39,2	11,8	66,3	7,4	27,4	9,8	38,0
>- 2,2	18,9	58,1	22,2	88,4	16,1	43,5	22,3	60,2
<i>Incond. Estável</i>	41,9	100,0	11,6	100,0	56,5	100,0	39,8	100,0

Classe de	CENÁRIO I							
-----------	-----------	--	--	--	--	--	--	--

estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,1	10,1	27,2	27,2	5,5	5,5	8,7	8,7
< -3,1	3,8	13,9	8,2	35,4	3,2	8,7	5,0	13,7
-3,1 - -2,8	5,1	19,0	6,8	42,2	3,7	12,4	4,9	18,7
-2,8 - -2,5	8,8	27,8	12,0	54,2	6,4	18,8	9,2	27,9
-2,5 - -2,2	10,1	37,9	12,3	66,6	7,2	26,1	9,8	37,7
> -2,2	19,4	57,3	22,6	89,2	15,9	42,0	21,7	59,4
<i>Incond. Estável</i>	42,7	100,0	10,8	100,0	58,0	100,0	40,6	100,0
CENÁRIO J								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	11,5	11,5	28,5	28,5	6,2	6,2	8,4	8,4
< -3,1	4,3	15,7	8,3	36,8	3,5	9,6	5,1	13,5
-3,1 - -2,8	5,3	21,1	7,3	44,2	3,9	13,6	5,4	19,0
-2,8 - -2,5	8,7	29,8	11,1	55,3	6,6	20,2	9,6	28,5
-2,5 - -2,2	9,7	39,5	11,6	66,9	7,4	27,6	9,7	38,3
> -2,2	18,7	58,2	21,6	88,5	16,0	43,6	22,1	60,4
<i>Incond. Estável</i>	41,8	100,0	11,5	100,0	56,4	100,0	39,6	100,0
CENÁRIO K								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,8	9,8	26,5	26,5	4,8	4,8	7,5	7,5
< -3,1	3,9	13,8	8,5	34,9	2,9	7,7	4,8	12,4
-3,1 - -2,8	4,9	18,7	6,8	41,7	3,4	11,1	5,0	17,4
-2,8 - -2,5	8,7	27,4	11,2	53,0	6,1	17,2	8,0	25,4
-2,5 - -2,2	10,1	37,5	11,8	64,7	7,1	24,4	9,6	35,0
> -2,2	20,0	57,5	22,9	87,6	15,7	40,1	20,5	55,5
<i>Incond. Estável</i>	42,5	100,0	12,4	100,0	59,9	100,0	44,5	100,0
CENÁRIO L								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,2	9,2	21,1	21,1	8,5	8,5	13,6	13,6
< -3,1	6,0	15,2	11,8	32,9	4,4	12,9	6,9	20,5
-3,1 - -2,8	5,9	21,1	8,7	41,6	3,6	16,5	5,1	25,6
-2,8 - -2,5	9,7	30,8	12,9	54,5	5,9	22,4	7,9	33,5
-2,5 - -2,2	10,7	41,5	13,4	68,0	6,5	29,0	8,9	42,4
> -2,2	20,2	61,7	23,9	91,9	14,3	43,3	18,9	61,3
<i>Incond. Estável</i>	38,3	100,0	8,1	100,0	56,7	100,0	38,7	100,0
CENÁRIO M								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	13,0	13,0	34,0	34,0	6,3	6,3	9,0	9,0
< -3,1	4,5	17,5	9,0	43,0	3,6	9,8	5,7	14,6
-3,1 - -2,8	5,2	22,7	7,0	50,0	4,1	13,9	5,4	20,1
-2,8 - -2,5	8,7	31,3	10,3	60,3	6,8	20,7	9,4	29,5
-2,5 - -2,2	9,6	41,0	10,9	71,3	7,5	28,2	11,0	40,5
> -2,2	18,9	59,8	19,3	90,5	16,5	44,7	22,8	63,3
<i>Incond. Estável</i>	40,2	100,0	9,5	100,0	55,3	100,0	36,7	100,0
CENÁRIO N								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	11,4	11,4	30,0	30,0	5,4	5,4	8,6	8,6
< -3,1	4,3	15,7	8,5	38,6	3,2	8,6	5,3	13,9
-3,1 - -2,8	5,5	21,2	7,3	45,8	3,8	12,4	5,0	18,9

-2,8 -- -2,5	9,1	30,3	11,7	57,5	6,7	19,1	9,7	28,6
-2,5 -- -2,2	10,2	40,6	11,9	69,4	7,6	26,8	10,8	39,5
> -2,2	19,6	60,1	21,2	90,6	16,6	43,4	23,3	62,7
<i>Incond. Estável</i>	39,9	100,0	9,4	100,0	56,6	100,0	37,3	100,0

Classe de estabilidade	CENÁRIO O							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	12,8	12,8	32,1	32,1	7,3	7,3	11,3	11,3
< -3,1	4,7	17,5	8,7	40,8	2,9	10,2	5,0	16,3
-3,1 -- -2,8	5,7	23,2	7,5	48,3	5,1	15,2	6,7	23,0
-2,8 -- -2,5	9,1	32,2	11,2	59,4	7,0	22,2	9,6	32,7
-2,5 -- -2,2	9,9	42,1	11,0	70,4	7,7	29,9	9,9	42,6
> -2,2	19,0	61,1	20,5	90,9	16,6	46,5	22,2	64,8
<i>Incond. Estável</i>	38,9	100,0	9,1	100,0	53,5	100,0	35,2	100,0

PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = E (elevação)

Classe de estabilidade	Resolução espacial 1m				Resolução espacial 10m			
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	2,4	2,4	7,7	7,7	0,7	0,7	1,1	1,1
< -3,1	1,4	3,8	4,5	12,2	1,2	1,9	2,2	3,3
-3,1 -- -2,8	2,1	5,9	4,4	16,6	1,7	3,6	2,2	5,5
-2,8 -- -2,5	5,7	11,5	10,0	26,6	4,0	7,6	5,7	11,2
-2,5 -- -2,2	8,5	20,0	15,2	41,8	5,3	12,9	8,8	20,0
> -2,2	19,5	39,6	32,6	74,4	12,8	25,7	19,5	39,5
<i>Incond. Estável</i>	60,4	100,0	25,6	100,0	74,3	100,0	60,5	100,0

Classe de estabilidade	CENÁRIO B							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,9	7,9	22,7	22,7	4,0	4,0	6,5	6,5
< -3,1	3,2	11,1	7,6	30,4	2,8	6,7	4,8	11,3
-3,1 -- -2,8	4,5	15,5	6,8	37,2	3,3	10,0	4,4	15,8
-2,8 -- -2,5	8,4	24,0	12,1	49,3	6,0	16,0	8,8	24,6
-2,5 -- -2,2	10,0	34,0	13,2	62,4	7,0	23,0	9,9	34,5
> -2,2	20,0	54,0	24,8	87,2	15,6	38,6	21,3	55,8
<i>Incond. Estável</i>	46,0	100,0	12,8	100,0	61,4	100,0	44,2	100,0

Classe de estabilidade	CENÁRIO C							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,3	7,3	21,2	21,2	3,6	3,6	5,9	5,9
< -3,1	3,0	10,3	7,5	28,7	2,6	6,2	4,5	10,5
-3,1 -- -2,8	4,3	14,6	6,7	35,4	3,1	9,4	4,4	14,9
-2,8 -- -2,5	8,3	22,9	12,1	47,5	5,9	15,3	8,6	23,5
-2,5 -- -2,2	10,0	32,9	13,4	61,0	6,9	22,1	9,9	33,4
> -2,2	20,1	53,0	25,5	86,5	15,5	37,6	21,4	54,8
<i>Incond. Estável</i>	47,0	100,0	13,5	100,0	62,4	100,0	45,2	100,0

Classe de estabilidade	CENÁRIO D							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,2	7,2	21,1	21,1	3,5	3,5	5,9	5,9
< -3,1	2,9	10,1	7,3	28,3	2,5	6,1	4,4	10,3
-3,1 -- -2,8	4,1	14,2	6,5	34,8	3,0	9,1	4,2	14,5
-2,8 -- -2,5	8,1	22,3	11,9	46,8	5,7	14,8	8,3	22,9

-2,5 -- 2,2	9,8	32,0	13,4	60,2	6,7	21,4	9,6	32,5
>- 2,2	19,8	51,9	25,6	85,7	15,0	36,5	21,1	53,6
<i>Incond. Estável</i>	48,1	100,0	14,3	100,0	63,5	100,0	46,4	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO E							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
< -3,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
-3,1 -- -2,8	0,1	0,2	0,2	0,4	0,0	0,0	0,1	0,3
-2,8 -- -2,5	0,3	0,5	0,5	0,9	0,2	0,3	0,3	0,6
-2,5 -- 2,2	0,9	1,4	1,7	2,6	0,5	0,8	0,5	1,1
>- 2,2	4,1	5,5	9,4	12,0	1,8	2,7	1,9	3,0
<i>Incond. Estável</i>	94,6	100,0	88,0	100,0	97,3	100,0	97,0	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO F							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	58,5	58,5	90,1	90,1	43,2	43,2	60,9	60,9
< -3,1	5,1	63,5	2,8	92,9	5,7	49,0	6,4	67,3
-3,1 -- -2,8	3,0	66,5	1,3	94,2	4,2	53,2	4,2	71,5
-2,8 -- -2,5	3,4	69,9	1,5	95,7	5,3	58,4	5,3	76,8
-2,5 -- 2,2	3,0	72,9	0,9	96,6	4,8	63,2	4,6	81,4
>- 2,2	6,2	79,2	2,1	98,8	8,3	71,5	7,1	88,5
<i>Incond. Estável</i>	20,8	100,0	1,2	100,0	28,5	100,0	11,5	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO G							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	3,5	3,5	9,5	9,5	1,3	1,3	1,6	1,6
< -3,1	1,7	5,2	5,1	14,7	1,4	2,7	2,6	4,2
-3,1 -- -2,8	2,5	7,6	4,9	19,6	2,0	4,7	2,7	6,9
-2,8 -- -2,5	6,3	13,9	10,3	29,9	4,4	9,1	5,9	12,7
-2,5 -- 2,2	8,8	22,7	15,3	45,1	5,5	14,6	9,2	22,0
>- 2,2	19,5	42,2	31,6	76,7	13,2	27,8	20,0	42,0
<i>Incond. Estável</i>	57,8	100,0	23,3	100,0	72,2	100,0	58,0	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO H							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,2	8,2	18,9	18,9	4,2	4,2	5,1	5,1
< -3,1	3,3	11,5	7,3	26,2	2,6	6,9	4,0	9,1
-3,1 -- -2,8	4,4	15,9	7,0	33,1	3,1	10,0	4,4	13,4
-2,8 -- -2,5	7,8	23,7	11,2	44,4	5,7	15,7	8,4	21,8
-2,5 -- 2,2	9,1	32,8	13,0	57,4	6,6	22,3	9,5	31,3
>- 2,2	18,2	51,0	25,2	82,6	14,6	36,8	20,3	51,6
<i>Incond. Estável</i>	49,0	100,0	17,4	100,0	63,2	100,0	48,4	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO I							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,3	7,3	20,2	20,2	3,7	3,7	5,9	5,9
< -3,1	3,0	10,3	7,3	27,6	2,6	6,3	4,3	10,1
-3,1 -- -2,8	4,2	14,5	6,5	34,1	3,0	9,3	4,4	14,5
-2,8 -- -2,5	8,0	22,5	11,6	45,7	5,6	14,9	8,2	22,8
-2,5 -- 2,2	9,6	32,1	13,6	59,2	6,6	21,5	9,5	32,3
>- 2,2	19,2	51,3	25,4	84,6	14,6	36,1	20,1	52,4
<i>Incond. Estável</i>	48,7	100,0	15,4	100,0	63,9	100,0	47,6	100,0
Classe de	CENÁRIO J							

estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,6	8,6	21,1	21,1	4,5	4,5	5,7	5,7
< -3,1	3,4	12,0	7,5	28,6	2,7	7,2	4,2	9,9
-3,1 - -2,8	4,5	16,5	6,8	35,4	3,2	10,4	4,5	14,4
-2,8 - -2,5	8,0	24,5	11,3	46,7	5,8	16,2	8,7	23,1
-2,5 - -2,2	9,2	33,7	12,6	59,3	6,7	22,9	9,1	32,2
> -2,2	18,4	52,1	24,4	83,7	14,8	37,7	20,4	52,7
<i>Incond. Estável</i>	47,9	100,0	16,3	100,0	62,3	100,0	47,3	100,0
CENÁRIO K								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,3	7,3	18,9	18,9	3,6	3,6	5,4	5,4
< -3,1	3,1	10,4	7,0	25,9	2,5	6,1	4,0	9,4
-3,1 - -2,8	4,1	14,4	6,3	32,2	2,9	9,0	4,2	13,6
-2,8 - -2,5	7,7	22,1	11,2	43,4	5,4	14,4	7,3	21,0
-2,5 - -2,2	9,3	31,4	12,5	55,9	6,3	20,8	8,6	29,6
> -2,2	19,1	50,5	25,2	81,1	14,0	34,8	18,9	48,5
<i>Incond. Estável</i>	49,5	100,0	18,9	100,0	65,2	100,0	51,5	100,0
CENÁRIO L								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	5,1	5,1	11,3	11,3	5,1	5,1	7,9	7,9
< -3,1	5,0	10,1	10,4	21,7	3,8	8,9	6,3	14,2
-3,1 - -2,8	5,1	15,2	8,1	29,7	3,3	12,2	4,8	19,0
-2,8 - -2,5	8,8	23,9	13,0	42,8	5,5	17,7	7,8	26,8
-2,5 - -2,2	10,3	34,2	14,8	57,5	6,1	23,8	8,7	35,5
> -2,2	21,0	55,2	30,3	87,9	13,2	37,0	18,6	54,1
<i>Incond. Estável</i>	44,8	100,0	12,1	100,0	63,0	100,0	45,9	100,0
CENÁRIO M								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,9	9,9	26,6	26,6	4,4	4,4	5,9	5,9
< -3,1	3,6	13,5	8,2	34,8	2,9	7,2	4,2	10,0
-3,1 - -2,8	4,5	18,0	6,6	41,3	3,3	10,5	4,7	14,7
-2,8 - -2,5	8,0	26,0	11,3	52,6	5,9	16,4	8,4	23,2
-2,5 - -2,2	9,1	35,1	11,9	64,6	6,7	23,1	9,7	32,8
> -2,2	18,6	53,8	22,4	87,0	15,3	38,4	21,5	54,3
<i>Incond. Estável</i>	46,2	100,0	13,0	100,0	61,6	100,0	45,7	100,0
CENÁRIO N								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,2	8,2	22,6	22,6	3,8	3,8	6,2	6,2
< -3,1	3,3	11,6	7,5	30,1	2,6	6,3	4,0	10,2
-3,1 - -2,8	4,6	16,2	6,8	36,9	3,1	9,4	4,5	14,7
-2,8 - -2,5	8,5	24,7	11,8	48,7	5,8	15,2	8,6	23,3
-2,5 - -2,2	9,9	34,6	13,1	61,8	7,0	22,2	10,4	33,7
> -2,2	19,8	54,5	24,8	86,6	15,5	37,7	21,9	55,6
<i>Incond. Estável</i>	45,5	100,0	13,4	100,0	62,3	100,0	44,4	100,0
CENÁRIO O								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,8	9,8	25,1	25,1	5,1	5,1	7,5	7,5
< -3,1	3,8	13,6	7,9	33,0	3,0	8,1	4,8	12,2
-3,1 - -2,8	4,8	18,4	7,0	40,0	3,4	11,5	4,9	17,1

-2,8 - -2,5	8,4	26,8	11,2	51,2	6,0	17,5	8,5	25,6
-2,5 - -2,2	9,5	36,3	12,5	63,7	7,0	24,5	9,9	35,5
>- 2,2	18,9	55,2	23,6	87,3	15,3	39,8	21,1	56,6
<i>Incond. Estável</i>	44,8	100,0	12,7	100,0	60,2	100,0	43,4	100,0

PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = D (declividade)								
Resolução espacial 1m					Resolução espacial 10m			
CENÁRIO A								
Classe de estabilidade	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
SHALSTAB	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	3,3	3,3	10,9	10,9	1,4	1,4	2,6	2,6
< -3,1	1,9	5,1	5,9	16,8	1,6	3,0	2,9	5,5
-3,1 - -2,8	2,8	7,9	5,3	22,1	2,3	5,3	2,9	8,4
-2,8 - -2,5	7,0	14,9	11,6	33,7	5,0	10,3	6,8	15,2
-2,5 - -2,2	9,8	24,7	15,7	49,4	6,3	16,6	9,8	25,0
>- 2,2	21,8	46,5	32,1	81,5	14,8	31,4	22,1	47,1
<i>Incond. Estável</i>	53,5	100,0	18,5	100,0	68,6	100,0	52,9	100,0
CENÁRIO B								
Classe de estabilidade	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
SHALSTAB	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,6	9,6	27,0	27,0	5,3	5,3	8,3	8,3
< -3,1	3,9	13,5	8,3	35,2	3,3	8,6	5,1	13,5
-3,1 - -2,8	5,2	18,7	7,3	42,6	3,8	12,4	5,6	19,1
-2,8 - -2,5	9,1	27,8	12,3	54,9	6,6	19,0	8,9	28,0
-2,5 - -2,2	10,5	38,4	12,7	67,6	7,4	26,5	10,1	38,1
>- 2,2	20,4	58,8	22,7	90,2	16,5	42,9	22,1	60,2
<i>Incond. Estável</i>	41,2	100,0	9,8	100,0	57,1	100,0	39,8	100,0
CENÁRIO C								
Classe de estabilidade	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
SHALSTAB	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,0	9,0	25,5	25,5	4,9	4,9	7,7	7,7
< -3,1	3,7	12,6	8,1	33,6	3,1	8,0	4,9	12,7
-3,1 - -2,8	5,0	17,7	7,2	40,8	3,7	11,8	5,4	18,1
-2,8 - -2,5	9,1	26,7	12,4	53,2	6,5	18,3	8,6	26,7
-2,5 - -2,2	10,6	37,3	13,1	66,3	7,4	25,6	10,4	37,1
>- 2,2	20,7	58,0	23,4	89,7	16,4	42,1	22,3	59,4
<i>Incond. Estável</i>	42,0	100,0	10,3	100,0	57,9	100,0	40,6	100,0
CENÁRIO D								
Classe de estabilidade	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
SHALSTAB	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,8	8,8	25,2	25,2	4,8	4,8	7,5	7,5
< -3,1	3,5	12,3	7,8	33,0	3,0	7,8	4,8	12,3
-3,1 - -2,8	4,8	17,2	7,0	40,0	3,6	11,4	5,1	17,4
-2,8 - -2,5	8,8	25,9	12,2	52,2	6,3	17,7	8,4	25,9
-2,5 - -2,2	10,4	36,3	13,1	65,3	7,1	24,8	10,2	36,1
>- 2,2	20,4	56,7	23,6	88,9	16,0	40,8	21,9	57,9
<i>Incond. Estável</i>	43,3	100,0	11,1	100,0	59,2	100,0	42,1	100,0
CENÁRIO E								
Classe de estabilidade	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
SHALSTAB	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
< -3,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,1	0,1	0,3	0,3
-3,1 - -2,8	0,1	0,2	0,4	0,8	0,1	0,2	0,2	0,5
-2,8 - -2,5	0,4	0,6	1,2	2,0	0,4	0,6	0,7	1,2

-2,5 -- 2,2	1,3	1,9	3,1	5,1	1,1	1,7	1,4	2,7
>- 2,2	6,4	8,3	18,4	23,5	3,6	5,3	4,9	7,6
<i>Incond. Estável</i>	91,8	100,0	76,5	100,0	94,7	100,0	92,4	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO F							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	59,5	59,5	90,7	90,7	44,2	44,2	61,9	61,9
< -3,1	5,0	64,5	2,7	93,4	5,8	50,0	6,3	68,2
-3,1 -- -2,8	2,9	67,4	1,3	94,7	4,2	54,2	4,1	72,3
-2,8 -- -2,5	3,3	70,7	1,3	96,0	5,2	59,4	5,3	77,6
-2,5 -- 2,2	2,9	73,7	0,8	96,8	4,7	64,1	4,5	82,1
>- 2,2	6,1	79,8	2,0	98,9	8,1	72,2	6,8	88,9
<i>Incond. Estável</i>	20,2	100,0	1,1	100,0	27,8	100,0	11,1	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO G							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	4,4	4,4	13,1	13,1	2,0	2,0	3,2	3,2
< -3,1	2,2	6,6	6,6	19,7	1,9	3,9	3,3	6,5
-3,1 -- -2,8	3,3	9,9	5,7	25,4	2,6	6,6	3,3	9,8
-2,8 -- -2,5	7,6	17,5	11,8	37,2	5,4	11,9	6,9	16,8
-2,5 -- 2,2	10,1	27,6	15,5	52,7	6,5	18,4	10,3	27,1
>- 2,2	21,5	49,1	30,4	83,2	15,1	33,5	22,8	49,9
<i>Incond. Estável</i>	50,9	100,0	16,8	100,0	66,5	100,0	50,1	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO H							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,6	9,6	23,5	23,5	5,3	5,3	6,8	6,8
< -3,1	3,9	13,5	8,3	31,8	3,2	8,4	4,5	11,3
-3,1 -- -2,8	5,1	18,7	7,3	39,2	3,7	12,1	4,9	16,2
-2,8 -- -2,5	8,8	27,4	11,8	50,9	6,5	18,6	9,3	25,5
-2,5 -- 2,2	10,0	37,4	12,6	63,5	7,3	25,9	9,9	35,4
>- 2,2	19,4	56,8	23,9	87,4	15,9	41,8	21,8	57,3
<i>Incond. Estável</i>	43,2	100,0	12,6	100,0	58,2	100,0	42,7	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO I							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,7	8,7	24,1	24,1	4,8	4,8	7,4	7,4
< -3,1	3,5	12,2	7,8	31,9	3,0	7,8	4,6	12,0
-3,1 -- -2,8	4,8	17,0	6,9	38,8	3,5	11,3	4,7	16,7
-2,8 -- -2,5	8,8	25,8	12,2	51,0	6,2	17,5	8,7	25,4
-2,5 -- 2,2	10,3	36,0	13,2	64,2	7,1	24,6	9,9	35,3
>- 2,2	20,0	56,1	24,1	88,3	15,6	40,2	21,7	57,0
<i>Incond. Estável</i>	43,9	100,0	11,7	100,0	59,8	100,0	43,0	100,0
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO J							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,1	10,1	25,2	25,2	5,5	5,5	7,2	7,2
< -3,1	4,0	14,1	8,1	33,4	3,2	8,7	4,6	11,9
-3,1 -- -2,8	5,2	19,2	7,2	40,6	3,8	12,5	5,1	17,0
-2,8 -- -2,5	8,7	28,0	11,6	52,1	6,5	18,9	9,2	26,2
-2,5 -- 2,2	9,9	37,9	12,3	64,4	7,2	26,2	9,6	35,8
>- 2,2	19,2	57,1	23,1	87,5	15,8	42,0	22,2	58,0
<i>Incond. Estável</i>	42,9	100,0	12,5	100,0	58,0	100,0	42,0	100,0
Classe de	CENÁRIO K							

estabilidade SHALSTAB	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,4	8,4	22,9	22,9	4,2	4,2	6,2	6,2
< -3,1	3,6	12,1	8,2	31,1	2,7	6,9	4,5	10,7
-3,1 - -2,8	4,7	16,8	7,1	38,1	3,2	10,1	4,6	15,3
-2,8 - -2,5	8,6	25,4	11,5	49,6	5,9	15,9	7,7	23,0
-2,5 - -2,2	10,2	35,6	12,2	61,9	7,0	22,9	9,4	32,4
> -2,2	20,5	56,1	24,3	86,2	15,4	38,3	20,0	52,3
<i>Incond. Estável</i>	43,9	100,0	13,8	100,0	61,7	100,0	47,7	100,0
CENÁRIO L								
estabilidade SHALSTAB	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,0	7,0	16,3	16,3	7,2	7,2	11,2	11,2
< -3,1	5,8	12,8	11,4	27,7	4,4	11,5	6,8	18,0
-3,1 - -2,8	5,8	18,6	8,7	36,4	3,6	15,2	5,1	23,1
-2,8 - -2,5	9,6	28,2	13,4	49,8	5,8	20,9	7,9	31,0
-2,5 - -2,2	10,9	39,2	14,6	64,4	6,4	27,3	8,5	39,5
> -2,2	21,3	60,5	26,9	91,2	13,9	41,2	18,7	58,2
<i>Incond. Estável</i>	39,5	100,0	8,8	100,0	58,8	100,0	41,8	100,0
CENÁRIO M								
estabilidade SHALSTAB	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	11,5	11,5	30,7	30,7	5,5	5,5	7,6	7,6
< -3,1	4,3	15,8	8,9	39,7	3,3	8,9	5,3	12,9
-3,1 - -2,8	5,0	20,8	7,2	46,9	3,9	12,7	5,0	17,9
-2,8 - -2,5	8,7	29,5	10,8	57,7	6,5	19,2	9,0	26,9
-2,5 - -2,2	9,7	39,2	11,5	69,2	7,4	26,6	10,4	37,3
> -2,2	19,3	58,5	20,6	89,8	16,3	42,9	22,9	60,1
<i>Incond. Estável</i>	41,5	100,0	10,2	100,0	57,1	100,0	39,9	100,0
CENÁRIO N								
estabilidade SHALSTAB	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,9	9,9	26,9	26,9	4,8	4,8	7,6	7,6
< -3,1	4,0	14,0	8,2	35,0	3,0	7,8	4,9	12,5
-3,1 - -2,8	5,3	19,3	7,3	42,3	3,6	11,4	4,7	17,1
-2,8 - -2,5	9,1	28,4	12,0	54,3	6,5	17,9	9,4	26,5
-2,5 - -2,2	10,4	38,8	12,7	67,0	7,5	25,4	10,5	37,1
> -2,2	20,2	59,0	22,8	89,8	16,4	41,8	22,9	59,9
<i>Incond. Estável</i>	41,0	100,0	10,2	100,0	58,2	100,0	40,1	100,0
CENÁRIO O								
estabilidade SHALSTAB	Área	Área	Cic.	Cic.	Área	Área	Cic.	Cic.
	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.	[%]	Ac.
<i>Incond. Instável</i>	11,4	11,4	29,2	29,2	4,7	4,7	6,9	6,9
< -3,1	4,4	15,8	8,5	37,7	3,3	8,0	5,6	12,5
-3,1 - -2,8	5,5	21,4	7,5	45,1	3,9	12,0	5,6	18,1
-2,8 - -2,5	9,1	30,5	11,6	56,7	6,9	18,9	9,3	27,4
-2,5 - -2,2	10,1	40,6	11,6	68,3	7,8	26,7	10,6	37,9
> -2,2	19,5	60,1	21,9	90,3	17,2	43,9	23,9	61,8
<i>Incond. Estável</i>	39,9	100,0	9,7	100,0	56,1	100,0	38,2	100,0

PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - $z = M$ (média zE e zD)

Resolução espacial 1m

Resolução espacial 10m

Classe de

CENÁRIO A

estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	2,9	2,9	9,5	9,5	1,0	1,0	2,1	2,1
< -3,1	1,7	4,5	5,3	14,7	1,4	2,5	2,6	4,6
-3,1 - -2,8	2,5	7,0	5,2	19,9	2,0	4,5	2,6	7,2
-2,8 - -2,5	6,5	13,5	10,9	30,8	4,7	9,2	6,5	13,7
-2,5 - -2,2	9,4	22,9	15,7	46,5	5,9	15,1	9,3	23,0
> -2,2	21,2	44,1	32,5	79,0	14,2	29,3	21,3	44,3
<i>Incond. Estável</i>	55,9	100,0	21,0	100,0	70,7	100,0	55,7	100,0

CENÁRIO B								
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,9	8,9	25,4	25,4	4,8	4,8	7,6	7,6
< -3,1	3,6	12,5	8,0	33,4	3,1	7,9	4,9	12,5
-3,1 - -2,8	5,0	17,5	7,2	40,5	3,6	11,5	5,4	17,9
-2,8 - -2,5	8,9	26,5	12,2	52,8	6,4	18,0	8,7	26,6
-2,5 - -2,2	10,4	36,9	13,0	65,7	7,3	25,3	10,2	36,8
> -2,2	20,4	57,3	23,5	89,2	16,3	41,5	22,0	58,8
<i>Incond. Estável</i>	42,7	100,0	10,8	100,0	58,5	100,0	41,2	100,0

CENÁRIO C								
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,3	8,3	24,0	24,0	4,4	4,4	7,0	7,0
< -3,1	3,4	11,7	7,7	31,7	3,0	7,3	4,9	11,9
-3,1 - -2,8	4,8	16,5	7,0	38,7	3,5	10,8	4,8	16,6
-2,8 - -2,5	8,8	25,3	12,3	51,0	6,4	17,2	8,8	25,4
-2,5 - -2,2	10,4	35,8	13,3	64,4	7,2	24,4	10,3	35,7
> -2,2	20,6	56,4	24,3	88,6	16,2	40,6	22,0	57,7
<i>Incond. Estável</i>	43,6	100,0	11,4	100,0	59,4	100,0	42,3	100,0

CENÁRIO D								
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,2	8,2	23,7	23,7	4,3	4,3	6,9	6,9
< -3,1	3,3	11,5	7,5	31,2	2,9	7,1	4,7	11,5
-3,1 - -2,8	4,6	16,1	6,8	38,0	3,3	10,5	4,6	16,1
-2,8 - -2,5	8,6	24,6	12,1	50,1	6,2	16,6	8,5	24,7
-2,5 - -2,2	10,2	34,8	13,3	63,4	7,0	23,7	10,1	34,8
> -2,2	20,3	55,1	24,4	87,9	15,7	39,4	21,6	56,4
<i>Incond. Estável</i>	44,9	100,0	12,1	100,0	60,6	100,0	43,6	100,0

CENÁRIO E								
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
< -3,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
-3,1 - -2,8	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,2	0,2	0,4
-2,8 - -2,5	0,3	0,5	0,8	1,2	0,3	0,5	0,5	0,9
-2,5 - -2,2	0,9	1,4	2,2	3,4	0,7	1,2	1,0	1,9
> -2,2	4,7	6,0	12,9	16,3	2,4	3,5	3,1	5,0
<i>Incond. Estável</i>	94,0	100,0	83,7	100,0	96,5	100,0	95,0	100,0

CENÁRIO F								
Classe de estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	59,1	59,1	90,5	90,5	43,9	43,9	61,6	61,6
< -3,1	5,0	64,2	2,7	93,2	5,7	49,6	6,2	67,8
-3,1 - -2,8	3,0	67,1	1,3	94,5	4,2	53,8	4,2	72,0

-2,8 -- -2,5	3,3	70,5	1,4	95,9	5,2	59,1	5,3	77,3
-2,5 -- -2,2	3,0	73,4	0,9	96,7	4,7	63,8	4,5	81,8
>- 2,2	6,1	79,6	2,1	98,8	8,1	71,9	6,9	88,7
<i>Incond. Estável</i>	20,4	100,0	1,2	100,0	28,1	100,0	11,3	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO G							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	3,9	3,9	11,4	11,4	1,7	1,7	2,7	2,7
< -3,1	2,0	5,9	6,0	17,3	1,7	3,4	3,0	5,6
-3,1 -- -2,8	3,0	8,9	5,6	22,9	2,3	5,7	3,0	8,6
-2,8 -- -2,5	7,1	16,0	11,3	34,2	5,0	10,8	6,7	15,3
-2,5 -- -2,2	9,7	25,7	15,5	49,7	6,2	17,0	10,0	25,3
>- 2,2	21,0	46,8	31,3	81,1	14,5	31,4	21,8	47,1
<i>Incond. Estável</i>	53,2	100,0	18,9	100,0	68,6	100,0	52,9	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO H							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,0	9,0	21,4	21,4	4,8	4,8	6,1	6,1
< -3,1	3,6	12,6	8,0	29,4	2,9	7,8	4,3	10,4
-3,1 -- -2,8	4,9	17,5	7,2	36,7	3,5	11,3	4,7	15,1
-2,8 -- -2,5	8,5	26,0	11,6	48,3	6,2	17,5	9,1	24,2
-2,5 -- -2,2	9,7	35,7	12,8	61,1	7,1	24,5	9,5	33,6
>- 2,2	19,3	55,0	24,8	85,9	15,5	40,0	21,3	54,9
<i>Incond. Estável</i>	45,0	100,0	14,1	100,0	60,0	100,0	45,1	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO I							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	8,1	8,1	22,5	22,5	4,3	4,3	6,8	6,8
< -3,1	3,3	11,4	7,6	30,1	2,8	7,2	4,4	11,2
-3,1 -- -2,8	4,6	16,0	6,7	36,9	3,3	10,5	4,6	15,8
-2,8 -- -2,5	8,5	24,6	12,1	48,9	6,1	16,6	8,5	24,3
-2,5 -- -2,2	10,1	34,7	13,3	62,3	7,0	23,5	9,8	34,1
>- 2,2	19,9	54,5	24,9	87,2	15,3	38,9	21,3	55,4
<i>Incond. Estável</i>	45,5	100,0	12,8	100,0	61,1	100,0	44,6	100,0

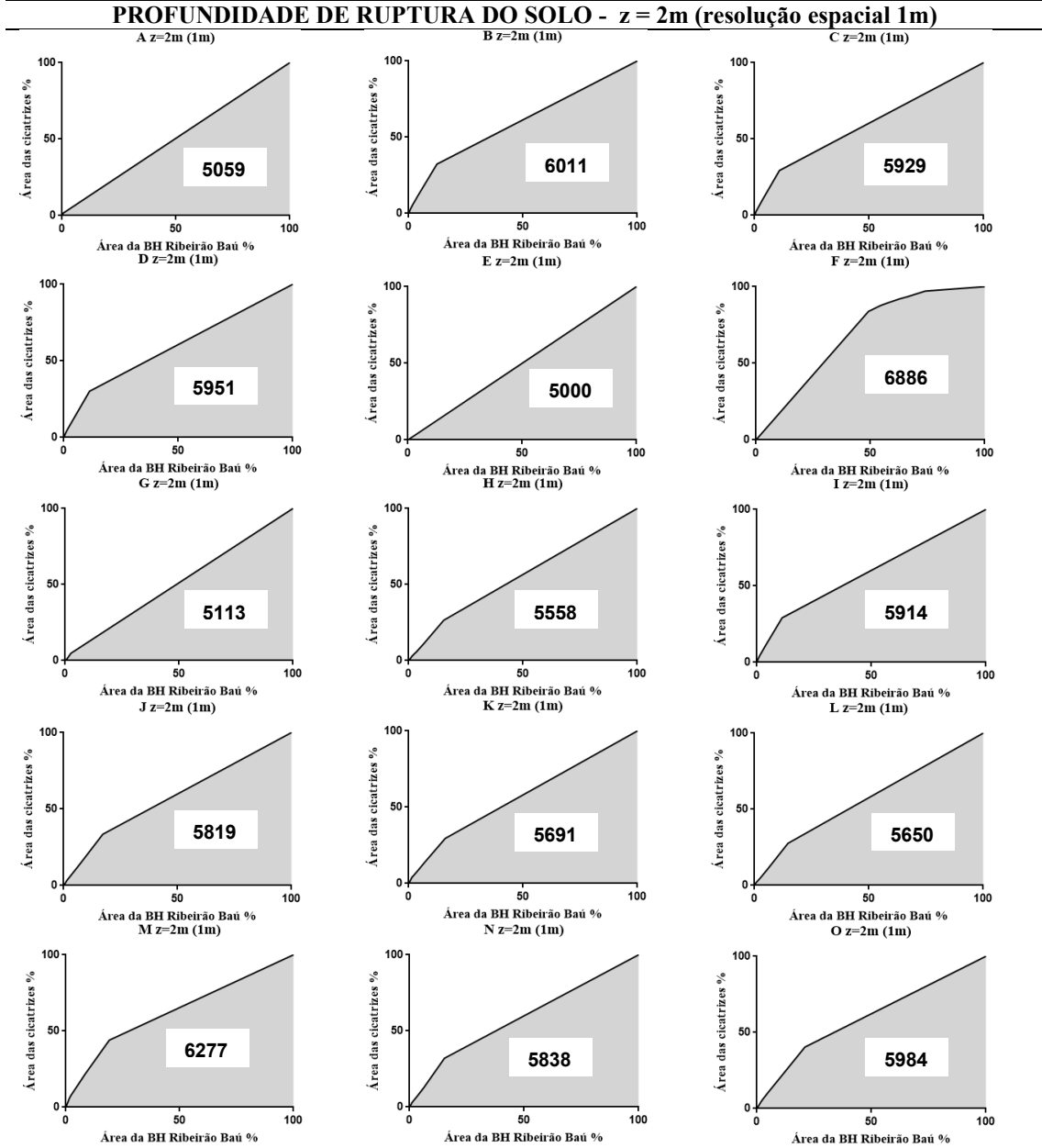
Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO J							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,5	9,5	23,6	23,6	5,1	5,1	6,6	6,6
< -3,1	3,7	13,2	7,9	31,4	3,0	8,1	4,6	11,2
-3,1 -- -2,8	4,9	18,2	7,0	38,5	3,6	11,7	4,7	15,8
-2,8 -- -2,5	8,5	26,7	11,6	50,0	6,3	17,9	9,2	25,1
-2,5 -- -2,2	9,7	36,4	12,4	62,4	7,1	25,0	9,4	34,4
>- 2,2	19,1	55,5	23,8	86,2	15,5	40,6	21,4	55,9
<i>Incond. Estável</i>	44,5	100,0	13,8	100,0	59,4	100,0	44,1	100,0

Classe de estabilidade SHALSTAB	CENÁRIO K							
	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	7,9	7,9	21,1	21,1	3,9	3,9	5,8	5,8
< -3,1	3,4	11,3	7,7	28,8	2,6	6,5	4,3	10,1
-3,1 -- -2,8	4,4	15,7	7,0	35,7	3,1	9,6	4,5	14,6
-2,8 -- -2,5	8,3	24,0	11,4	47,2	5,6	15,2	7,5	22,1
-2,5 -- -2,2	9,9	33,9	12,5	59,7	6,7	21,9	9,0	31,1
>- 2,2	20,2	54,1	24,9	84,6	14,9	36,8	19,6	50,7
<i>Incond. Estável</i>	45,9	100,0	15,4	100,0	63,2	100,0	49,3	100,0

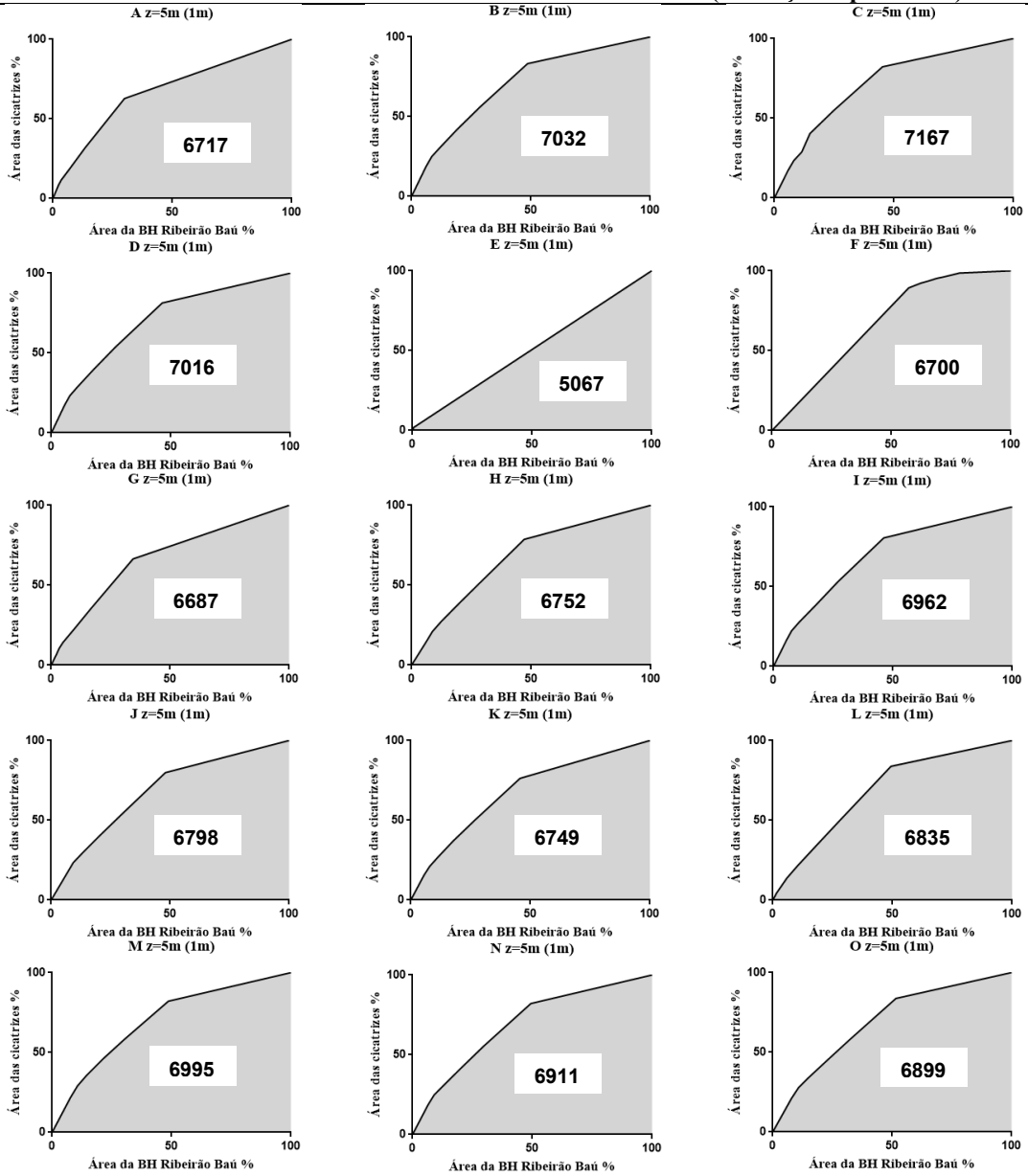
Classe de	CENÁRIO L							
-----------	-----------	--	--	--	--	--	--	--

estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	6,1	6,1	14,1	14,1	6,3	6,3	9,8	9,8
< -3,1	5,6	11,7	11,0	25,1	4,2	10,5	6,7	16,5
-3,1 - -2,8	5,6	17,2	8,4	33,5	3,6	14,1	4,9	21,4
-2,8 - -2,5	9,4	26,6	13,5	47,0	5,7	19,8	7,9	29,3
-2,5 - -2,2	10,8	37,4	14,8	61,8	6,3	26,0	8,7	37,9
> -2,2	21,5	58,9	28,4	90,2	13,6	39,6	18,5	56,4
<i>Incond. Estável</i>	41,1	100,0	9,8	100,0	60,4	100,0	43,6	100,0
CENÁRIO M								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,9	10,9	29,1	29,1	5,0	5,0	6,8	6,8
< -3,1	4,0	14,9	8,6	37,7	3,1	8,2	5,1	11,9
-3,1 - -2,8	4,8	19,7	7,1	44,8	3,7	11,9	4,7	16,6
-2,8 - -2,5	8,5	28,2	11,0	55,8	6,3	18,1	8,7	25,3
-2,5 - -2,2	9,6	37,8	11,7	67,5	7,2	25,3	10,1	35,4
> -2,2	19,2	57,0	21,4	88,9	16,0	41,4	22,6	58,1
<i>Incond. Estável</i>	43,0	100,0	11,1	100,0	58,6	100,0	41,9	100,0
CENÁRIO N								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	9,3	9,3	25,2	25,2	4,4	4,4	7,1	7,1
< -3,1	3,8	13,1	7,9	33,1	2,8	7,3	4,5	11,5
-3,1 - -2,8	5,1	18,2	7,1	40,2	3,4	10,7	4,7	16,2
-2,8 - -2,5	9,0	27,1	12,0	52,2	6,2	16,9	9,0	25,3
-2,5 - -2,2	10,3	37,4	12,9	65,1	7,3	24,2	10,5	35,8
> -2,2	20,2	57,6	23,6	88,7	16,2	40,4	22,7	58,6
<i>Incond. Estável</i>	42,4	100,0	11,3	100,0	59,6	100,0	41,4	100,0
CENÁRIO O								
estabilidade SHALSTAB	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.	Área [%]	Área Ac.	Cic. [%]	Cic. Ac.
<i>Incond. Instável</i>	10,8	10,8	27,5	27,5	4,9	4,9	7,2	7,2
< -3,1	4,2	14,9	8,3	35,8	3,2	8,1	5,3	12,5
-3,1 - -2,8	5,3	20,2	7,4	43,2	3,7	11,8	5,1	17,6
-2,8 - -2,5	8,9	29,1	11,5	54,6	6,6	18,3	9,1	26,7
-2,5 - -2,2	10,0	39,1	12,0	66,6	7,5	25,9	10,3	37,0
> -2,2	19,5	58,5	22,7	89,3	16,5	42,4	22,8	59,8
<i>Incond. Estável</i>	41,5	100,0	10,7	100,0	57,6	100,0	40,2	100,0

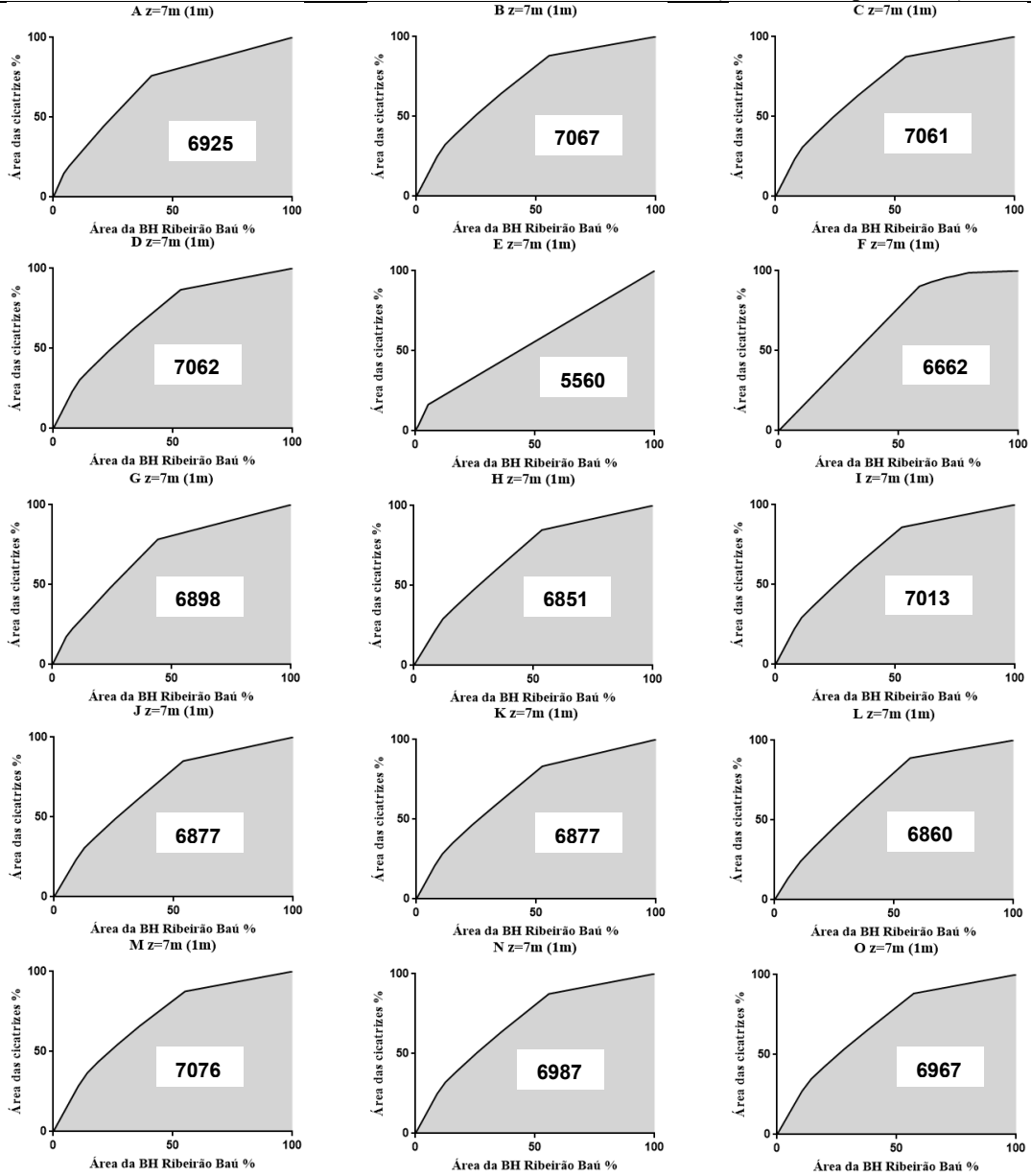
APÊNDICE D – Área Abaixo da Curva (AAC) de Predição para os cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (resolução espacial 1 e 10m).



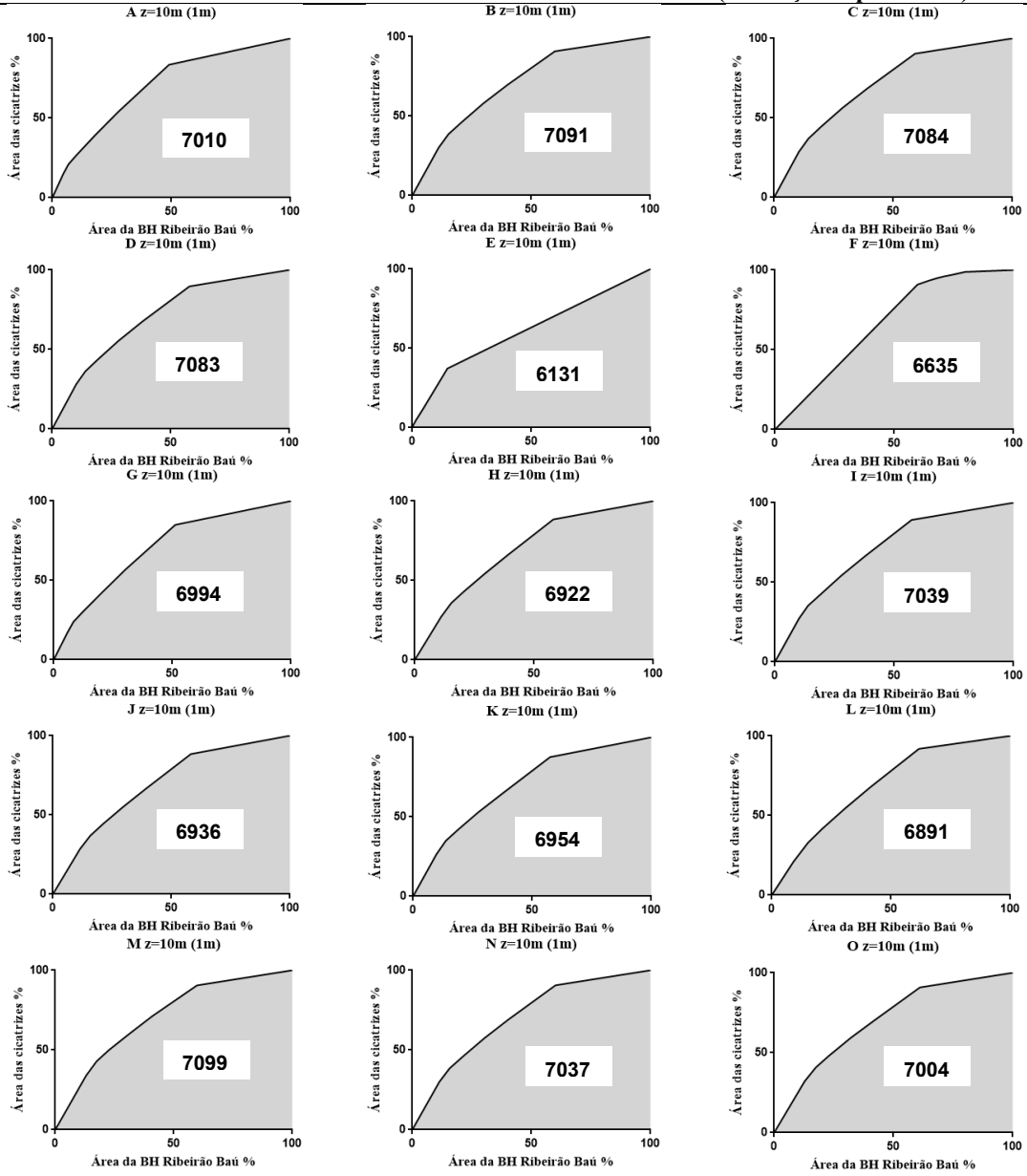
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 5m (resolução espacial 1m)



PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 7m (resolução espacial 1m)



PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 10m (resolução espacial 1m)



7010

7091

7084

7083

6131

6635

6994

6922

7039

6936

6954

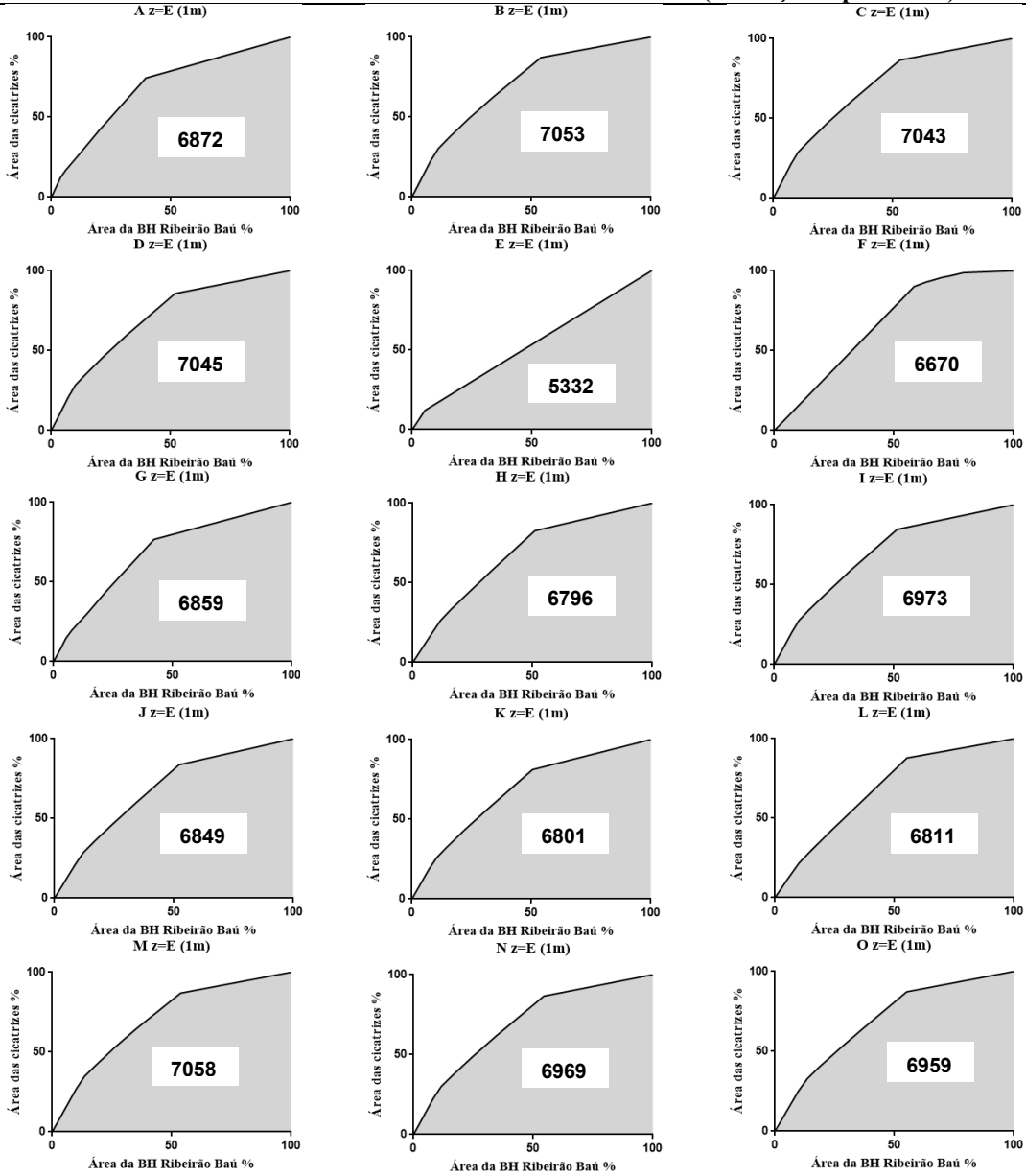
6891

7099

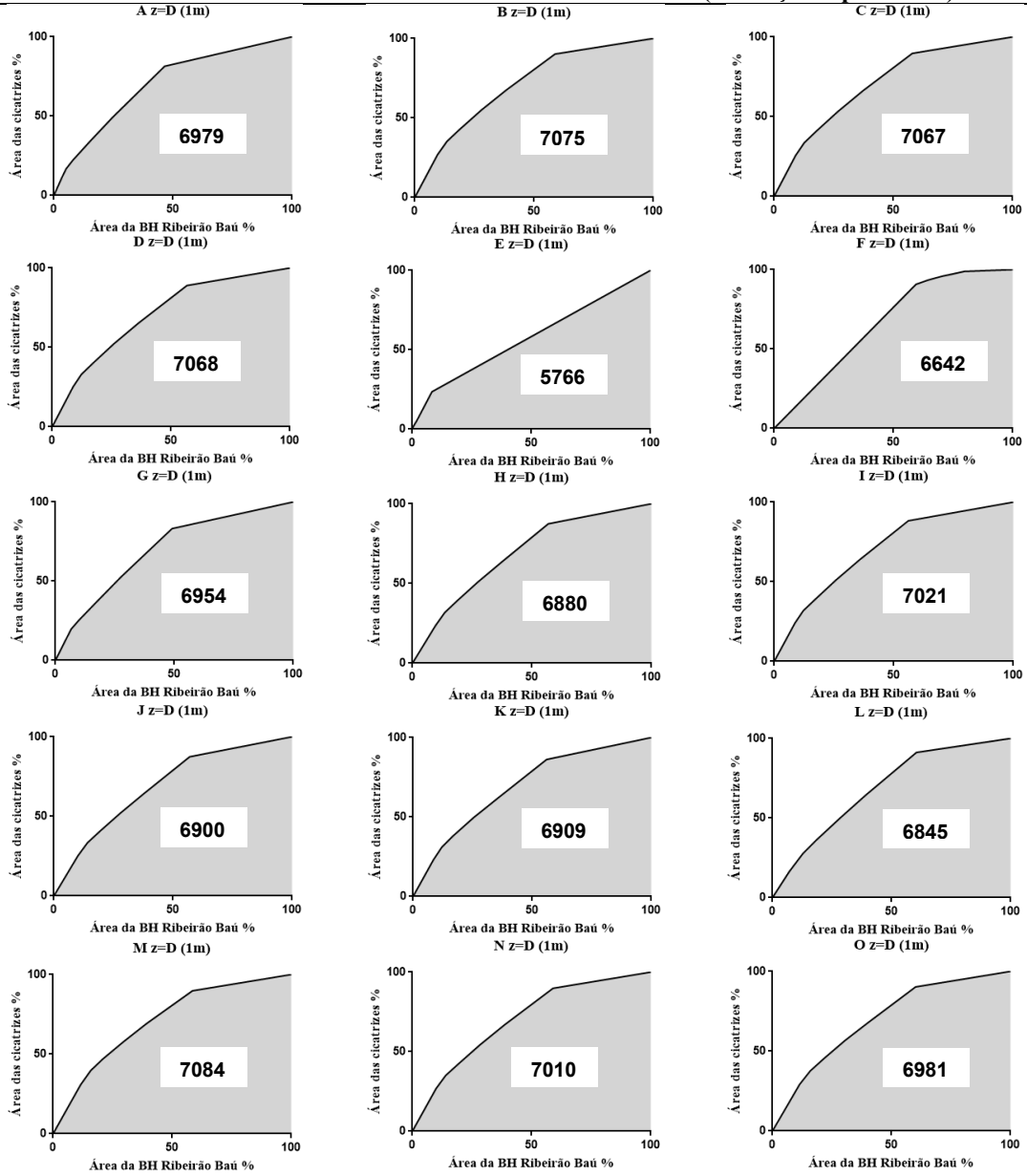
7037

7004

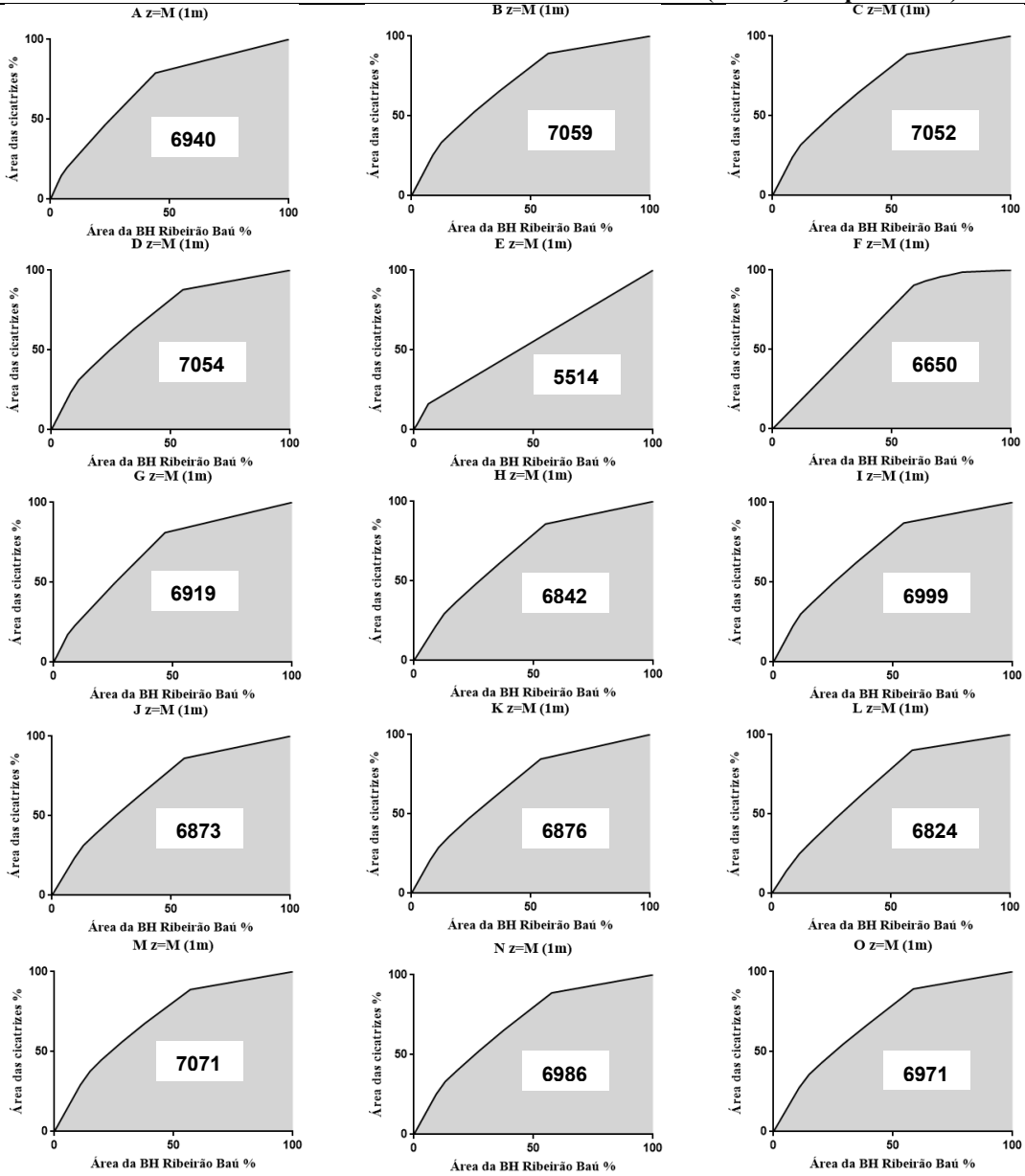
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = E (resolução espacial 1m)



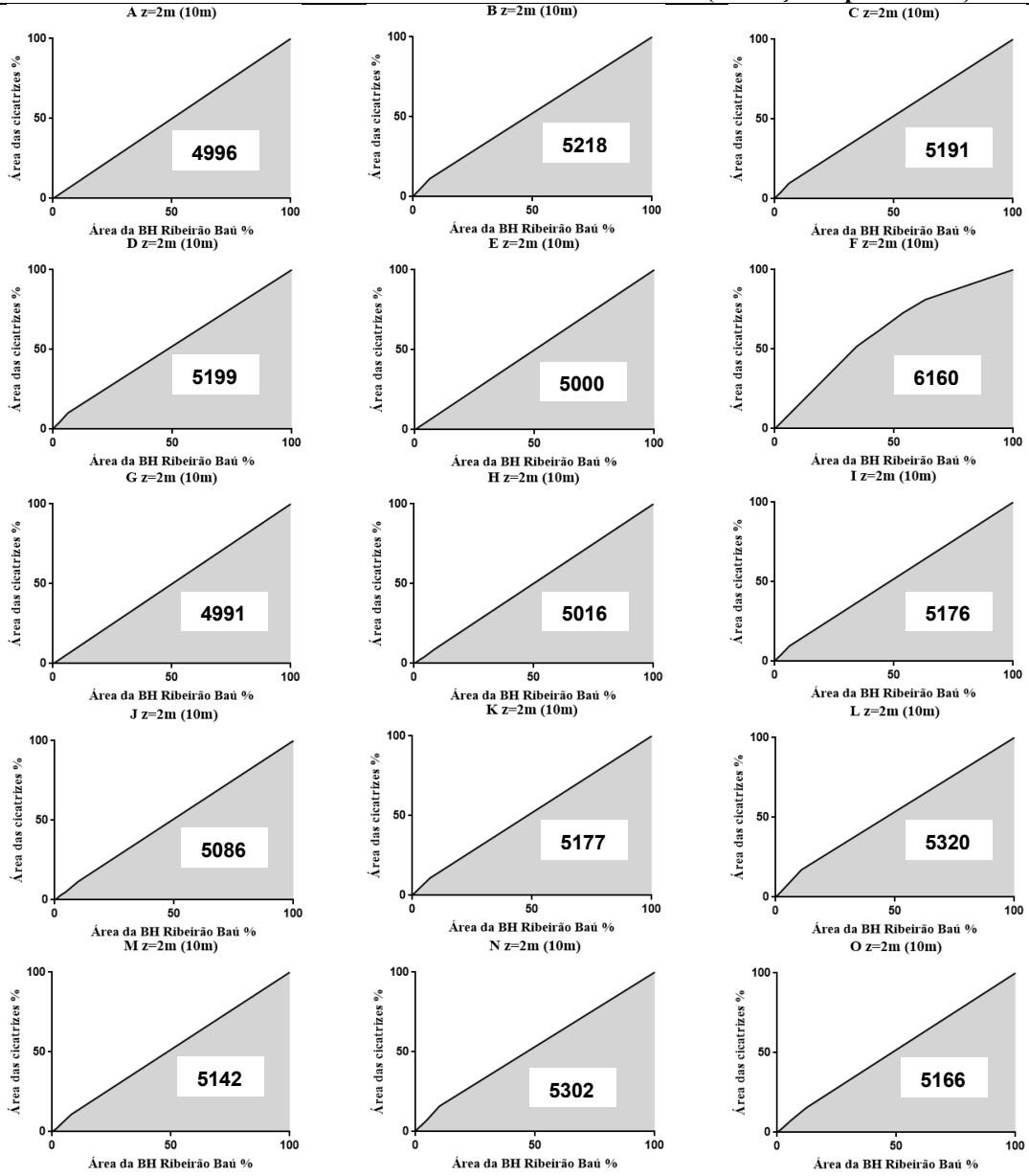
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - $z = D$ (resolução espacial 1m)



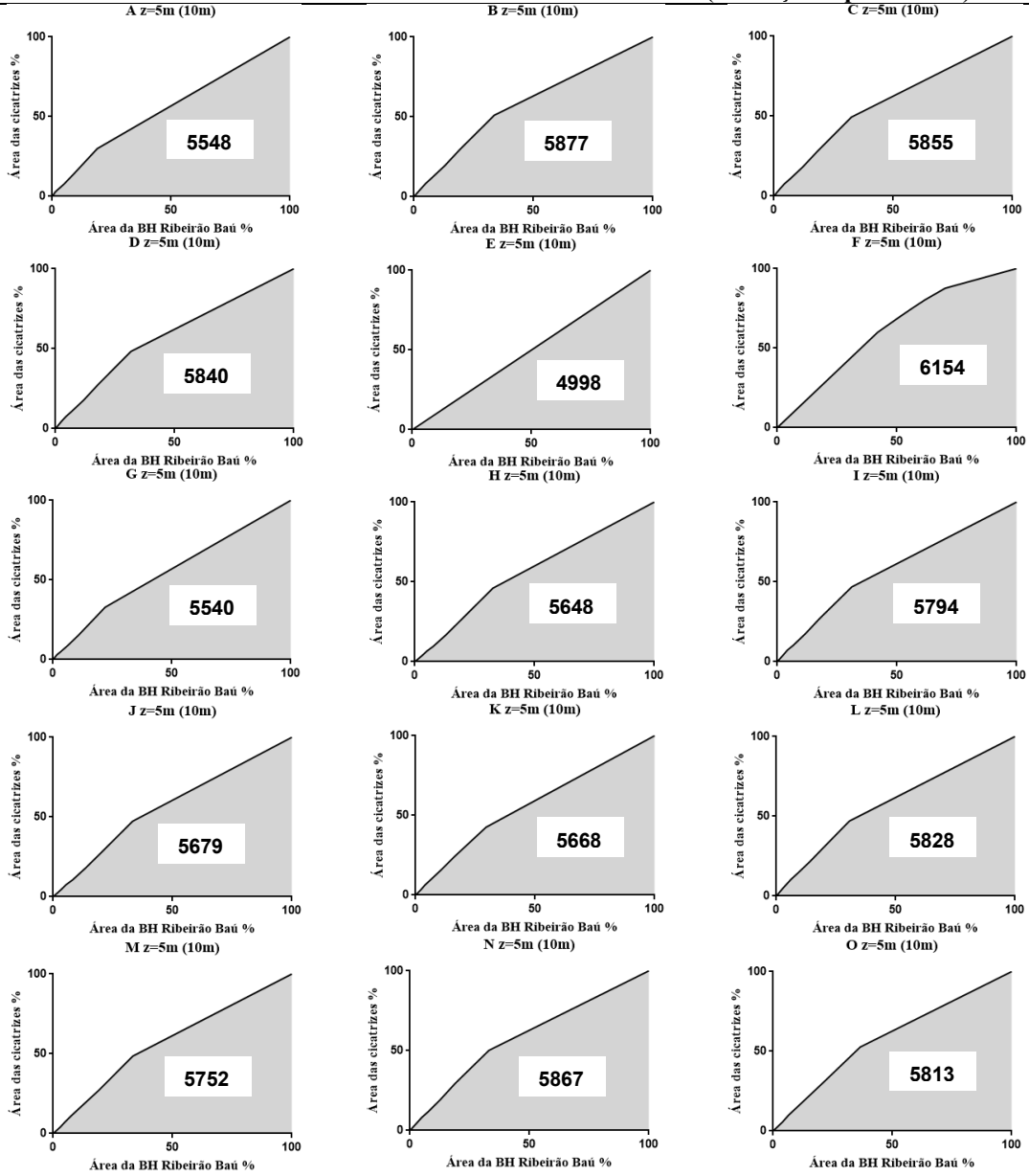
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = M (resolução espacial 1m)



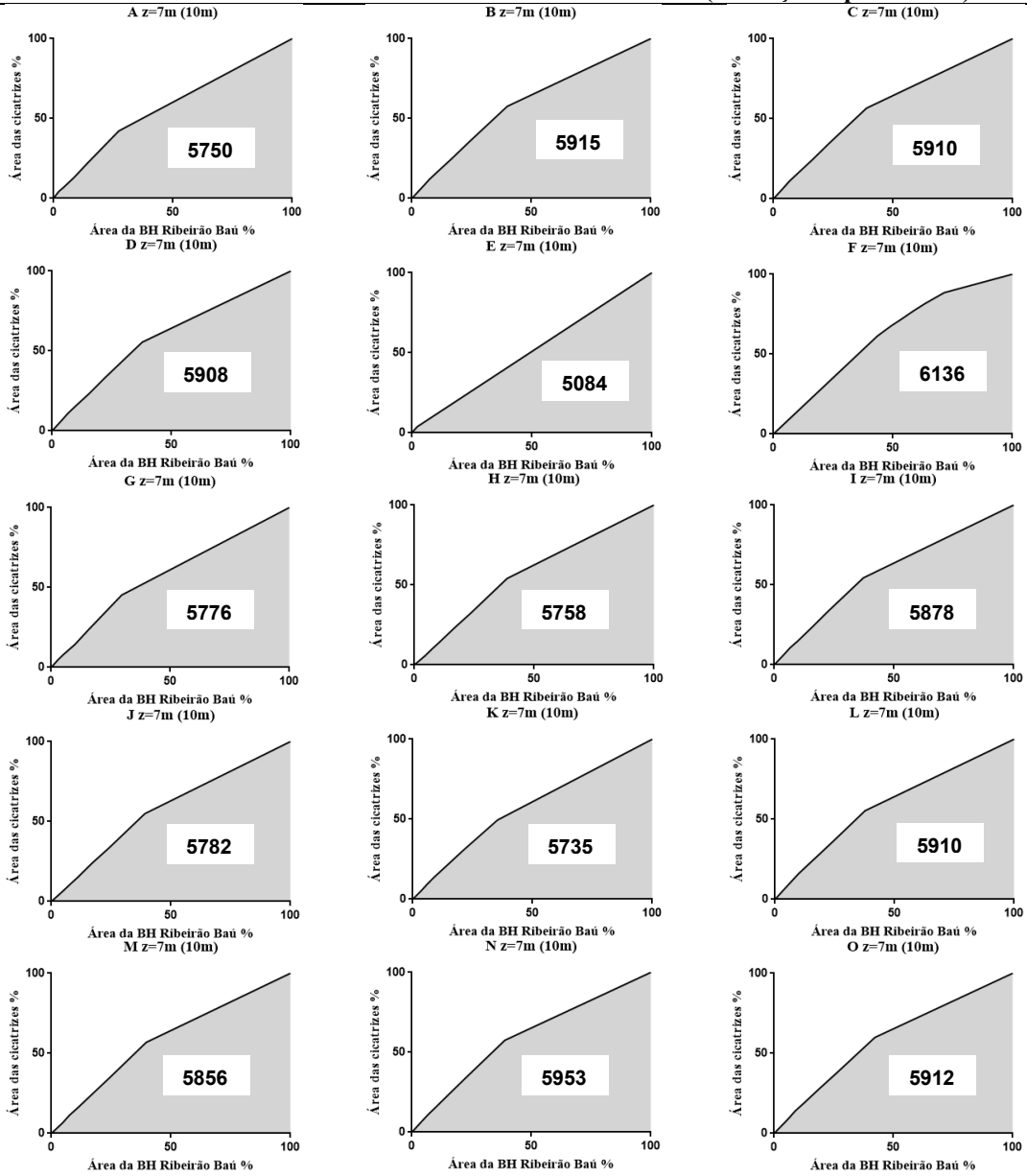
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 2m (resolução espacial 10m)



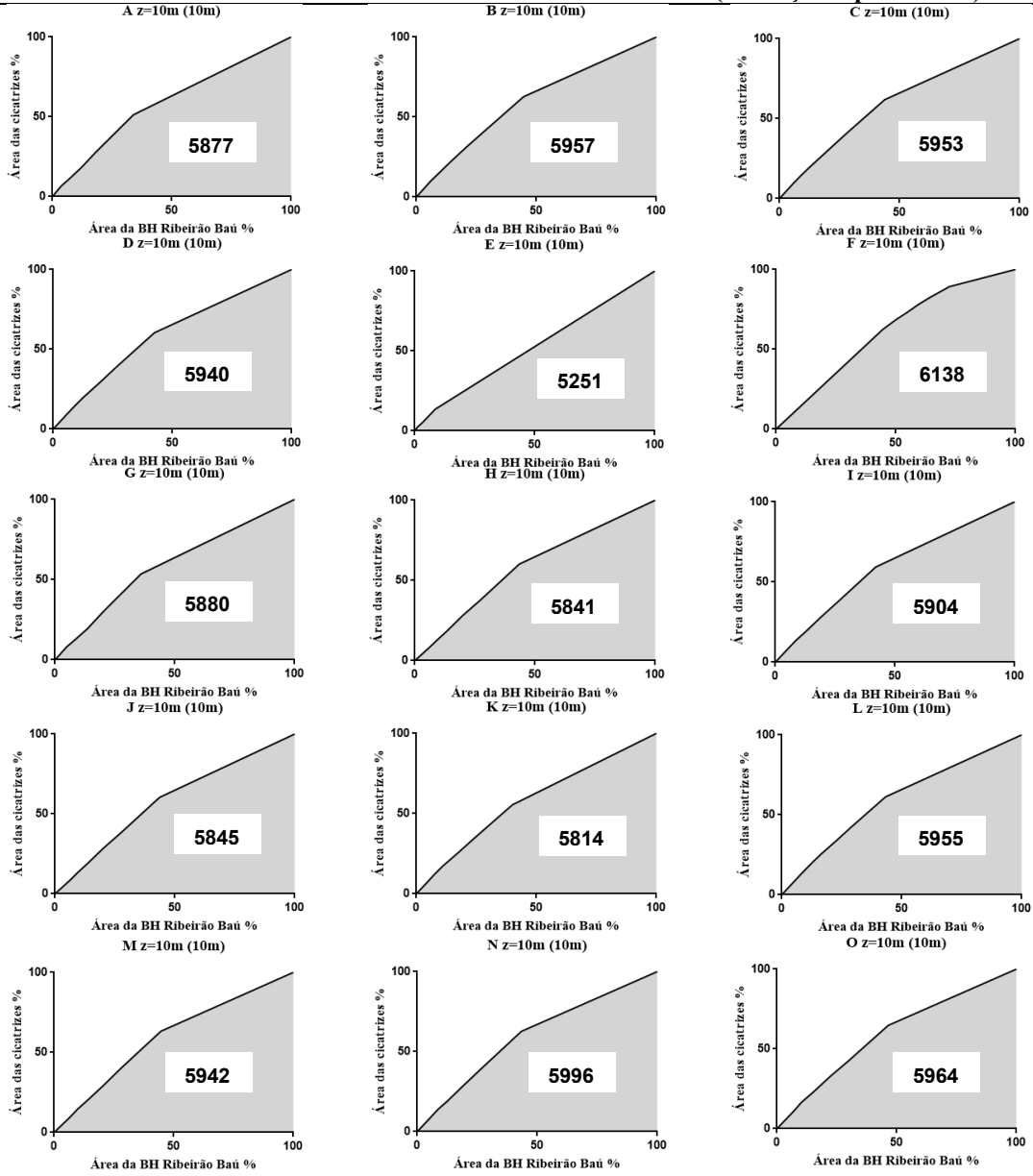
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 5m (resolução espacial 10m)



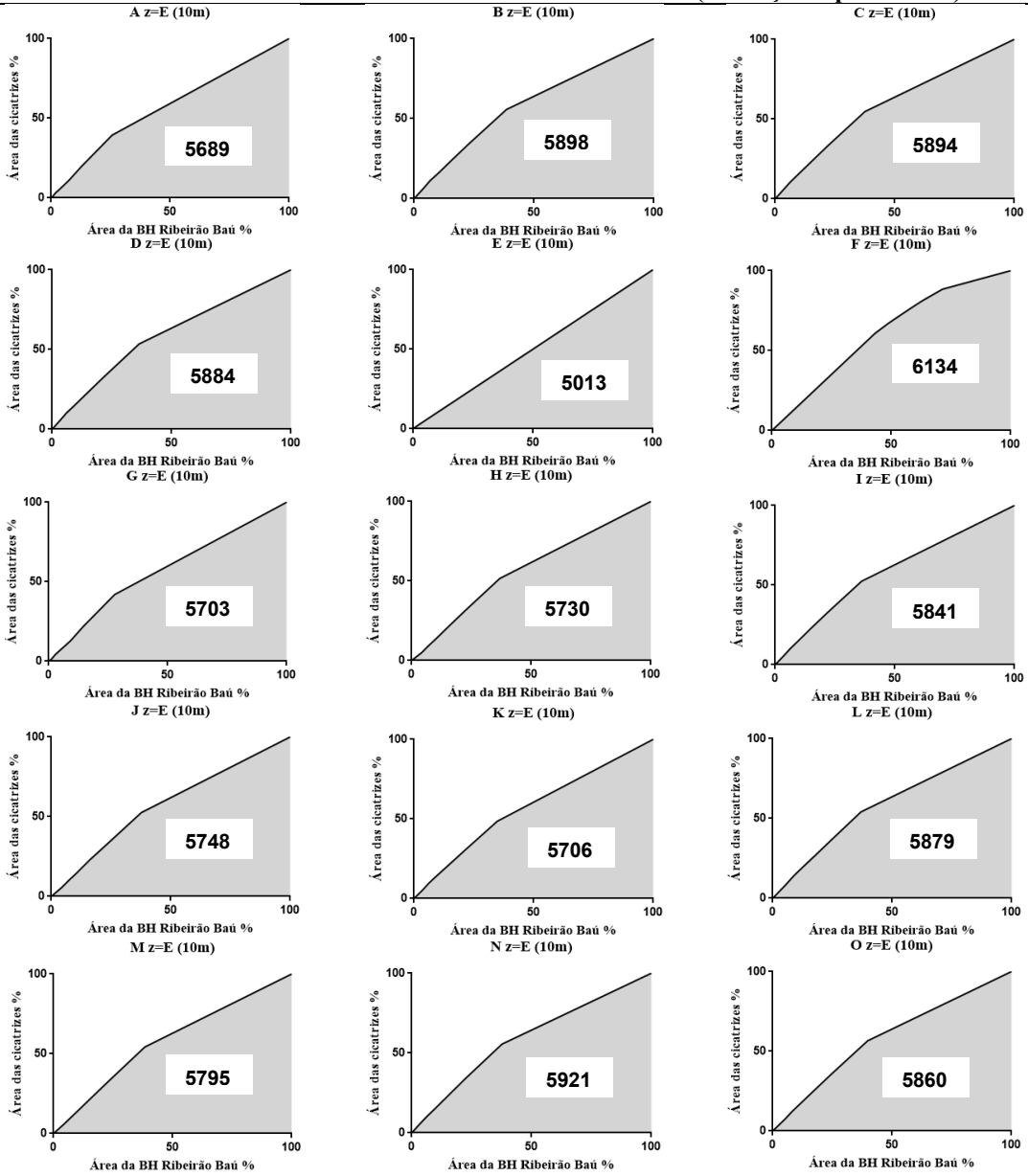
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = 7m (resolução espacial 10m)



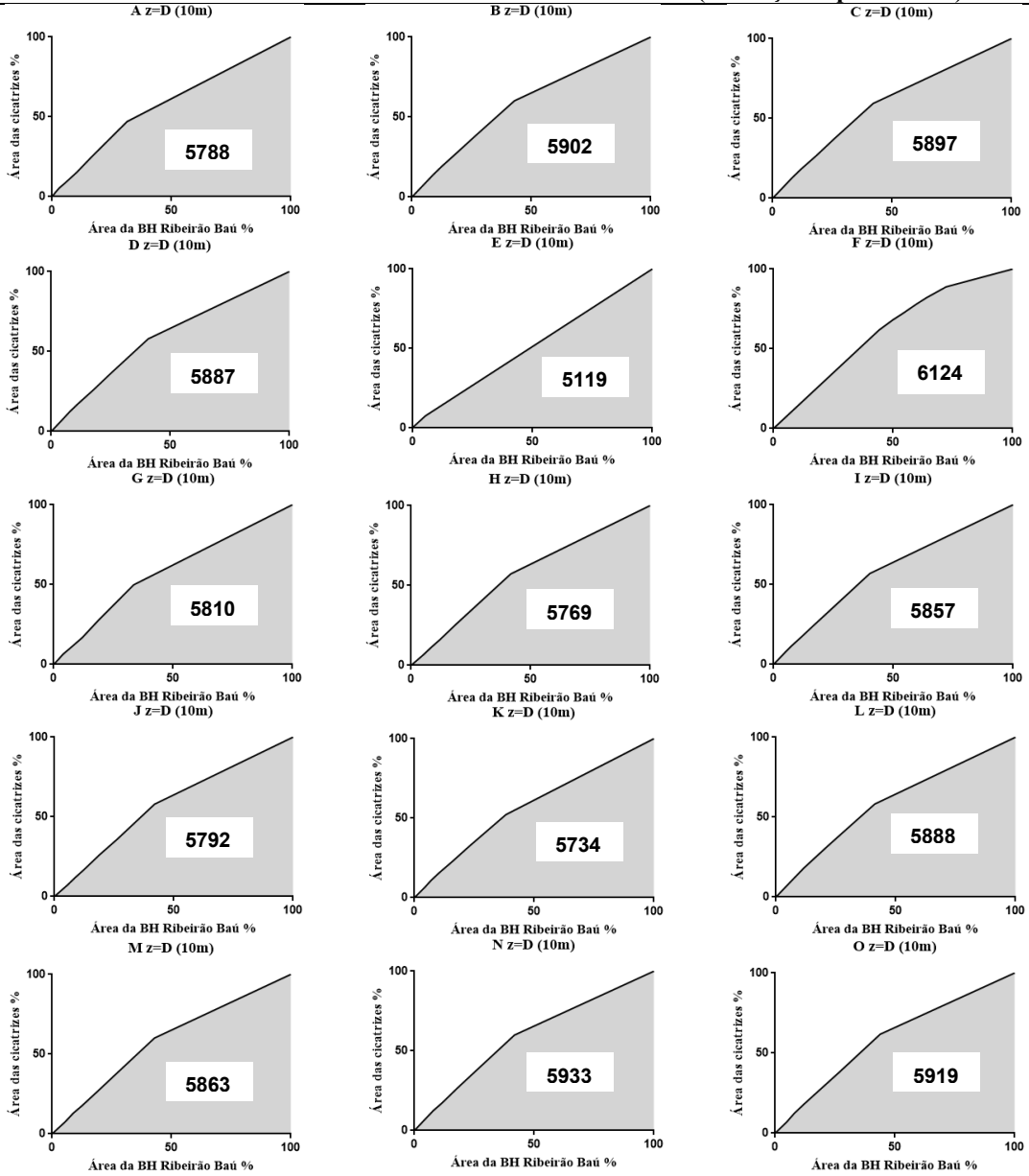
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - $z = 10m$ (resolução espacial 10m)



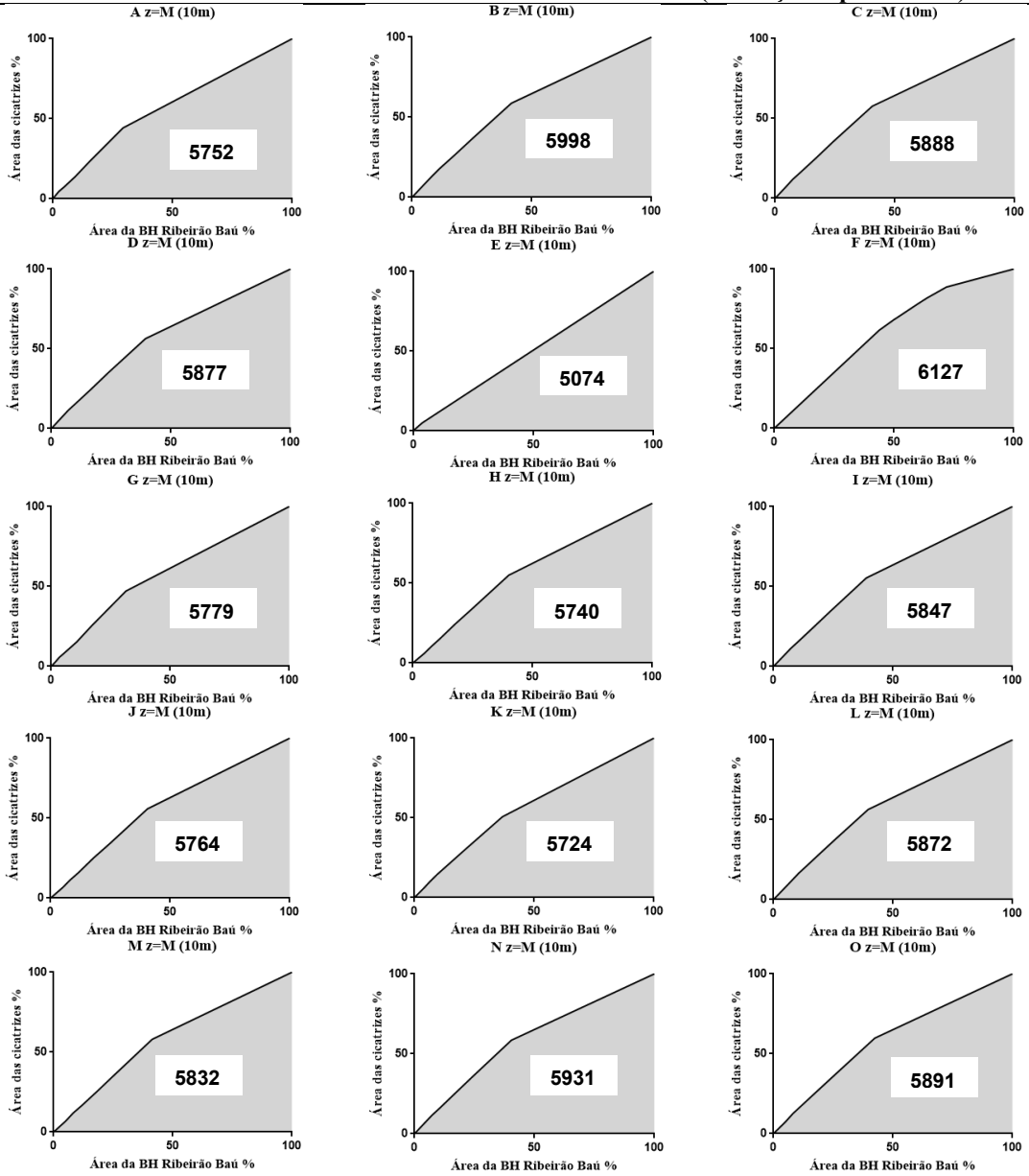
PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - z = E (resolução espacial 10m)



PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - $z = D$ (resolução espacial 10m)



PROFUNDIDADE DE RUPTURA DO SOLO - $z = M$ (resolução espacial 10m)



APÊNDICE E – Hierarquização dos valores de Área Abaixo da Curva (AAC) de Predição para os cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (resolução espacial 1 e 10m).

1° 0,7167	2° 0,7099	3° 0,7091	4° 0,7084	5° 0,7083	6° 0,7076	7° 0,7075	8° 0,7071
C z=5m (1m)	M z=10m (1m)	B z=10m (1m)	C z=10m (1m) M z=D (1m)	D z=10m (1m)	M z=7m (1m)	B z=D (1m)	M z=M (1m)
9° 0,7068	10° 0,7067	11° 0,7062	12° 0,7061	13° 0,7059	14° 0,7058	15° 0,7054	16° 0,7053
D z=D (1m)	B z=7m (1m) C z=D (1m)	D z=7m (1m)	C z=7m (1m)	B z=M (1m)	M z=E (1m)	D z=M (1m)	B z=E (1m)
17° 0,7052	18° 0,7045	19° 0,7043	20° 0,7039	21° 0,7037	22° 0,7032	23° 0,7021	24° 0,7016
C z=M (1m)	D z=E (1m)	C z=E (1m)	I z=10m (1m)	N z=10m (1m)	B z=5m (1m)	I z=D (1m)	D z=5m (1m)
25° 0,7013	26° 0,7010	27° 0,7004	28° 0,6999	29° 0,6995	30° 0,6994	31° 0,6987	32° 0,6986
I z=7m (1m)	A z=10m (1m) N z=D (1m)	O z=10m (1m)	I z=M (1m)	M z=5m (1m)	G z=10m (1m)	N z=7m (1m)	N z=M (1m)
33° 0,6981	34° 0,6979	35° 0,6973	36° 0,6970	37° 0,6969	38° 0,6967	39° 0,6962	40° 0,6959
O z=D (1m)	A z=D (1m)	I z=E (1m)	O z=M (1m)	N z=E (1m)	O z=7m (1m)	I z=5m (1m)	O z=E (1m)
41° 0,6954	42° 0,6940	43° 0,6936	44° 0,6925	45° 0,6922	46° 0,6919	47° 0,6911	48° 0,6909
G z=D (1m) K z=10m (1m)	A z=M (1m)	J z=10m (1m)	A z=7m (1m)	H z=10m (1m)	G z=M (1m)	N z=5m (1m)	K z=D (1m)
49° 0,6900	50° 0,6899	51° 0,6898	52° 0,6891	53° 0,6886	54° 0,6880	55° 0,6877	56° 0,6876
J z=D (1m)	O z=5m (1m)	G z=7m (1m)	L z=10m (1m)	F z=2m (1m)	H z=D (1m)	J z=7m (1m) K z=7m (1m)	K z=M (1m)
57° 0,6873	58° 0,6872	59° 0,6860	60° 0,6859	61° 0,6851	62° 0,6849	63° 0,6845	64° 0,6842
J z=M (1m)	A z=E (1m)	L z=7m (1m)	G z=E (1m)	H z=7m (1m)	J z=E (1m)	L z=D (1m)	H z=M (1m)
65° 0,6835	66° 0,6824	67° 0,6811	68° 0,6801	69° 0,6798	70° 0,6796	71° 0,6752	72° 0,6749
L z=5m (1m)	L z=M (1m)	L z=E (1m)	K z=E (1m)	J z=5m (1m)	H z=E (1m)	H z=5m (1m)	K z=5m (1m)
73° 0,6717	74° 0,6700	75° 0,6687	76° 0,6670	77° 0,6662	78° 0,6650	79° 0,6642	80° 0,6635
A z=5m (1m)	F z=5m (1m)	G z=5m (1m)	F z=E (1m)	F z=7m (1m)	F z=M (1m)	F z=D (1m)	F z=10m (1m)
81° 0,6277	82° 0,6160	83° 0,6154	84° 0,6138	85° 0,6136	86° 0,6134	87° 0,6131	88° 0,6127
M z=2m (1m)	F z=2m (10m)	F z=5m (10m)	F z=10m (10m)	F z=7m (10m)	F z=E (10m)	E z=10m (1m)	F z=M (10m)
89° 0,6124	90° 0,6011	91° 0,5998	92° 0,5996	93° 0,5984	94° 0,5964	95° 0,5957	96° 0,5955
F z=D (10m)	B z=2m (1m)	B z=M (10m)	N z=10m(10m)	O z=2m (1m)	Oz=10m(10m)	Bz=10m(10m)	Lz=10m(10m)
97° 0,5953	98° 0,5951	99° 0,5942	100° 0,5940	101° 0,5933	102° 0,5931	103° 0,5929	104° 0,5921
Cz=10m(10m) N z=7m (10m)	D z=2m (1m)	M z=10m (10m)	D z=10m(10m)	N z=D (10m)	N z=M (10m)	C z=2m (1m)	N z=E (10m)
105° 0,5919	106° 0,5915	107° 0,5914	108° 0,5912	109° 0,5910	110° 0,5908	111° 0,5904	112° 0,5902
O z=D (10m)	B z=7m (10m)	I z=2m (1m)	O z=7m (10m)	C z=7m (10m) L z=7m (10m)	D z=7m (10m)	I z=10m (10m)	B z=D (10m)
113° 0,5898	114° 0,5897	115° 0,5894	116° 0,5891	117° 0,5888	118° 0,5887	119° 0,5884	120° 0,5880
B z=E (10m)	C z=D (10m)	C z=E (10m)	O z=M (10m)	C z=M (10m) L z=D (10m)	D z=D (10m)	D z=E (10m)	Gz=10m(10m)
121° 0,5879	122° 0,5878	123° 0,5877	124° 0,5872	125° 0,5867	126° 0,5863	127° 0,5860	128° 0,5857
L z=E (10m)	I z=7m (10m)	Az=10m(10m) B z=5m (10m) D z=M (10m)	L z=M (10m)	N z=5m (10m)	M z=D (10m)	O z=E (10m)	I z=D (10m)
129° 0,5856	130° 0,5855	131° 0,5847	132° 0,5845	133° 0,5841	134° 0,5840	135° 0,5838	136° 0,5832
M z=7m(10m)	C z=5m (10m)	I z=M (10m)	J z=10m (10m)	H z=10m(10m) I z=E (10m)	D z=5m (10m)	N z=2m (1m)	M z=M (10m)

137° 0,5828	138° 0,5819	139° 0,5814	140° 0,5813	141° 0,5810	142° 0,5795	143° 0,5794	144° 0,5792
L z=5m (10m)	J z=2m (1m)	Kz=10m(10m)	O z=5m (10m)	G z=D (10m)	M z=E (10m)	I z=5m (10m)	J z=D (10m)
145° 0,5788	146° 0,5782	147° 0,5779	148° 0,5776	149° 0,5769	150° 0,5766	151° 0,5764	152° 0,5758
A z=D (10m)	J z=7m (10m)	G z=M (10m)	G z=7m (10m)	H z=D (10m)	E z=D (1m)	J z=M (10m)	H z=7m(10m)
153° 0,5752	154° 0,5750	155° 0,5748	156° 0,5740	157° 0,5735	158° 0,5734	159° 0,5730	160° 0,5724
A z=M (10m) M z=5m(10m)	A z=7m (10m)	J z=E (10m)	H z=M (10m)	K z=7m (10m)	K z=D (10m)	H z=E (10m)	K z=M (10m)
161° 0,5706	162° 0,5703	163° 0,5691	164° 0,5689	165° 0,5679	166° 0,5668	167° 0,5650	168° 0,5648
K z=E (10m)	G z=E (10m)	K z=2m (1m)	A z=E (10m)	J z=5m (10m)	K z=5m (10m)	L z=2m (1m)	H z=5m(10m)
169° 0,5560	170° 0,5558	171° 0,5548	172° 0,5540	173° 0,5514	174° 0,5332	175° 0,5320	176° 0,5302
E z=7m (1m)	H z=2m (1m)	A z=5m (10m)	G z=5m (10m)	E z=M (1m)	E z=E (1m)	L z=2m (10m)	N z=2m(10m)
177° 0,5251	178° 0,5218	179° 0,5199	180° 0,5191	181° 0,5177	182° 0,5176	183° 0,5166	184° 0,5142
Ez=10m(10m)	B z=2m (10m)	D z=2m (10m)	C z=2m (10m)	K z=2m (10m)	I z=2m (10m)	O z=2m (10m)	Mz=2m(10m)
185° 0,5119	186° 0,5113	187° 0,5086	188° 0,5084	189° 0,5074	190° 0,5067	191° 0,5059	192° 0,5016
E z=D (10m)	G z=2m (1m)	J z=2m (10m)	E z=7m (10m)	E z=M (10m)	E z=5m (1m)	A z=2m (1m)	H z=2m(10m)
193° 0,5013	194° 0,5000	195° 0,4998	196° 0,4996	197° 0,4991			
E z=E (10m)	E z=2m (10m) E z=2m (1m)	E z=5m (10m)	A z=2m (10m)	G z=2m (10m)			