

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Gabriel Maccari

Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no Município de Ascurra – SC

Florianópolis

2022

Gabriel Maccari

Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no Município de Ascurra – SC

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Geologia do Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Liliana Sayuri Osako

Florianópolis

2022

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

Maccari, Gabriel

Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no
Município de Ascurra - SC / Gabriel Maccari ; orientador,
Liliana Sayuri Osako, 2022.

119 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de
Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Movimentos gravitacionais de massa. 3.
Desastres naturais. 4. Sistemas de Informações Geográficas.
5. Geologia. I. Osako, Liliana Sayuri. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Geologia. III.
Título.

Gabriel Maccari

Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no Município de Ascurra – SC

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia e aprovado em sua forma final pelo Coordenador do Curso de Geologia.

Florianópolis, 24 de março de 2022.

Prof. Neivaldo Araújo de Castro, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Liliana Sayuri Osako, Dr.^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Erik Wunder, MSc.
Avaliador
ERW Geomecânica

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, prof.^a Liliana, que dedicou quantias inimagináveis de tempo neste último ano para me ajudar a desenvolver e finalizar este trabalho, e sempre esteve presente e disposta a tirar dúvidas e oferecer sugestões e conselhos.

À minha família, que sempre demonstrou total apoio e paciência, não apenas durante as infindáveis e, muitas vezes, estressantes horas de escrita e elaboração deste trabalho, mas também ao longo de toda a minha vida.

Aos meus amigos da Geologia, que me deram apoio, abrigo e encorajamento ao longo da elaboração deste estudo.

Aos meus amigos de Chapecó, que contribuíram com sugestões e explicações na área de programação para tornar as etapas deste trabalho mais rápidas e eficientes.

À Universidade Federal de Santa Catarina e, em especial, ao Departamento de Geologia, por todo o aprendizado que obtive nesses últimos cinco anos.

Aos meus colegas do IMA-SC de Chapecó, que me proporcionaram um grande enriquecimento pessoal e profissional nos últimos meses.

E a todos que contribuíram de uma forma ou outra para a elaboração deste trabalho.

Muito obrigado.

RESUMO

O Vale do Itajaí, localizado na porção centro-norte do estado de Santa Catarina (SC), tem sido afetado continuamente nas últimas décadas por desastres naturais, em especial deslizamentos e inundações. Apesar disso, não existem ainda estudos com foco na suscetibilidade a deslizamentos no município de Ascurra, no médio Vale do Itajaí. Geologicamente, a área de estudo está posicionada no limite entre as rochas metamórficas paleoproterozoicas do Complexo Granulítico de Santa Catarina (CGSC) e as rochas vulcânicas e sedimentares neoproterozoicas da Bacia do Itajaí, sendo recoberta em sua porção oeste pelas rochas sedimentares permianas da Bacia do Paraná. Visando a suplementar o conhecimento sobre os fatores condicionantes a movimentos de massa na região e prover aos órgãos administrativos do município uma base cartográfica para o planejamento urbano, o presente trabalho apresenta a atualização do inventário de deslizamentos e os resultados da análise de suscetibilidade a movimentos de massa no município de Ascurra. Para a determinação da suscetibilidade a deslizamentos utilizou-se os métodos da lógica *fuzzy* e relação de frequência. Os seis fatores condicionantes selecionados para análise de suscetibilidade foram: litologia, declividade, uso e ocupação do solo, distância de estruturas (falhas/fraturas), orientação das encostas e altitude. Realizou-se a atualização do inventário de deslizamento através da fotointerpretação de ortofotos, imagens do satélite CBERS-4A e modelos digitais de superfície, mapeamento em campo e consulta à bibliografia da área, resultando na identificação de 96 cicatrizes de movimentos de massa. Foram utilizados 75% (n=72) dos deslizamentos mapeados para o cálculo dos graus de pertinência, e os 25% restantes (n=24) foram usados para a validação dos mapas gerados. Foi possível identificar que declividades entre 50 e 60°, encostas voltadas para norte e nordeste, uso do solo para campos e pastagens e litologias gnáissicas do CGSC e pelíticas da Bacia do Itajaí são os fatores com maior influência para a suscetibilidade a deslizamentos no município de Ascurra. A geração dos mapas de suscetibilidade foi realizada utilizando valores entre 0,75 e 0,9 para o operador *fuzzy gamma*. Os mapas foram validados através de curvas de *Receiver Operating Characteristics* (ROC) e pela área abaixo da curva (*Area Under Curve* – AUC), e a maior acurácia (78,3%) foi obtida com o valor de *gamma* 0,825. O mapa de suscetibilidade a deslizamentos permite identificar que a maior parte da área de muito alta suscetibilidade no município de Ascurra está situada nas microbacias do Ribeirão São Paulo (71,62%) e Guaricana (15,1%). As zonas de muito alta suscetibilidade estão localizadas principalmente em áreas afastadas da ocupação urbana e de benfeitorias rurais, com exceção da localidade de Ribeirão Oitenta, no noroeste do município, que necessita de monitoramento devido à sua instabilidade.

Palavras-chave: Movimentos gravitacionais de massa. Geologia. Sistemas de Informações Geográficas. Suscetibilidade. Ascurra.

ABSTRACT

The Itajaí Valley, located in the north-central portion of the state of Santa Catarina (SC), has been continuously affected by natural disasters in recent decades, especially landslides and floods. Despite this, there are still no studies focusing on the landslide susceptibility in the municipality of Ascurra, in the Middle Itajaí Valley. Geologically, the study area is positioned on the boundary between the Paleoproterozoic metamorphic rocks of the Santa Catarina Granulitic Complex (SCGC) and the Neoproterozoic volcanic and sedimentary rocks of the Itajaí Basin, being covered in its western portion by the Permian sedimentary rocks of the Paraná Basin. Aiming to supplement the knowledge about the landslide causative factors in the region and provide the municipality's administrative bodies with a cartographic basis for urban planning, the present work features an update of the landslide inventory, and the landslide susceptibility analysis results in the municipality of Ascurra. To determine landslide susceptibility, the methods of fuzzy logic and frequency ratio were used. The six causative factors selected for susceptibility analysis were: lithology, slope, land use/land cover, distance from structures (faults/fractures), slope orientation, and altitude. The landslide inventory was updated through the photointerpretation of orthophotos, CBERS-4A satellite imagery, and digital surface models, field mapping, and consultation of the area's bibliography, resulting in the identification of 96 mass movement scars. 75% (n=72) of the mapped landslides were used to calculate the fuzzy membership values, and the remaining 25% (n=24) were used to validate the generated maps. It was possible to identify that slopes between 50 and 60°, north and northeast facing slopes, land use for fields and pastures, gneiss lithologies from the SCGC, and pelitic lithologies from the Itajaí Basin are the factors with the greatest influence on landslide susceptibility in the municipality of Ascurra. The preparation of susceptibility maps was performed using fuzzy gamma operator values between 0.75 and 0.9. The maps were validated through Receiver Operating Characteristics (ROC) curves and area under the curve (AUC), and the highest accuracy (78.3%) was obtained with the gamma value of 0.825. The landslide susceptibility map shows that most of the very high susceptibility areas in the municipality of Ascurra are located in the Ribeirão São Paulo (71.62%) and Guaricana (15.1%) microbasins. These very high susceptibility zones are located mainly in areas far from urban and rural occupation, with the exception of the village of Ribeirão Oitenta, in the northwest sector of the municipality, which needs monitoring due to its instability.

Keywords: Landslides. Geology. Geographic Information Systems. Susceptibility. Ascurra.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do município de Ascurra – SC.....	19
Figura 2 – Cinturão Dom Feliciano.....	21
Figura 3 – Cinturão Dom Feliciano e seus domínios na porção leste de Santa Catarina	22
Figura 4 – Mapa geológico da Bacia do Itajaí, com indicação da localização aproximada da área de estudo em vermelho.....	26
Figura 5 – Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná e distribuição temporal das Supersequências	29
Figura 6 – Relação espacial das estruturas da primeira fase de deformação da Bacia do Itajaí	31
Figura 7 – Direções preferenciais de ocorrência das principais estruturas da Bacia do Itajaí e embasamento próximo.....	32
Figura 8 – Arcabouço estrutural regional da Bacia do Paraná, com destaque em vermelho para a localização aproximada da área de estudo	33
Figura 9 – Mapa geológico da área de estudo	35
Figura 10 – Bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açú	36
Figura 11 – Hidrografia da área de estudo	37
Figura 12 – Deslizamentos translacionais.....	44
Figura 13 – Deslizamentos rotacionais.....	45
Figura 14 – Ilustração esquemática de um escorregamento em cunha.....	45
Figura 15 – Corridas de massa	46
Figura 16 – Quedas de blocos.....	46
Figura 17 – Rastejos	47
Figura 18 – Fluxograma de etapas do trabalho.....	59
Figura 19 – Fluxograma das etapas de processamento digital de imagens do satélite CBERS-4A	60
Figura 20 – Correção aplicada ao ruído no MDT.....	61
Figura 21 – Fluxograma das etapas de processamento para geração de mapas de altitude, declividade, orientação das encostas e relevo sombreado a partir do MDT.....	62
Figura 22 – Exemplo de cicatriz de deslizamento identificada a partir das ortofotos e do MDS	63

Figura 23 – Resposta espectral de deslizamento recente nas imagens do CBERS-4A.....	64
Figura 24 – Fluxograma de dados utilizados para confecção dos mapas de fatores condicionantes e inventário de deslizamentos.....	68
Figura 25 – Exemplo esquemático de uma reclassificação para atribuição de graus de pertinência a um arquivo matricial contendo classes de um fator condicionante	70
Figura 26 – Representação da integração dos dados para calcular o grau de suscetibilidade a deslizamentos	71
Figura 27 – Escorregamento de grandes proporções ocorrido em Ascurra no ano de 2011, na localidade de Ribeirão Oitenta, próximo ao limite municipal com Rodeio.	74
Figura 28 – Mapa de localização dos 11 deslizamentos identificados durante o trabalho de campo	75
Figura 29 – Escorregamento recente na região sudoeste de Ascurra, próximo à localidade de Guaricanas II, às margens da estrada para Ibirama, no ponto DSL-07	75
Figura 30 – Deslizamentos identificados durante o trabalho de campo	76
Figura 31 – Inventário de deslizamentos para o município de Ascurra, com 96 pontos registrados.....	77
Figura 32 – Separação do inventário de deslizamentos em pontos de treinamento (75% = 72 pontos) e pontos de validação (25% = 24 pontos).....	78
Figura 33 – Mapa dos afloramentos visitados em campo para reconhecimento lito-estrutural da área de estudo	79
Figura 34 – Afloramento de arenito conglomerático no ponto ASC-07, região sudoeste de Ascurra, localidade de Guaricanas II.....	80
Figura 35 – Afloramento de arenitos e conglomerados da Formação Garcia, no ponto ASC-05, próximo ao limite municipal entre Ascurra e Apiúna, localidade de Santa Bárbara.....	81
Figura 36 – Afloramentos de siltitos e arenitos laminados visitados em campo.....	82
Figura 37 – Atitudes das camadas sedimentares e bandamentos gnáissicos na área de estudo.	83
Figura 38 – Rochas vulcânicas félsicas encontradas na região central de Ascurra, ponto ASC-12	84
Figura 39 – Lentes de siltito em meio a folhelhos da Fm. Taciba, Bacia do Paraná, no ponto ASC-10.....	85

Figura 40 – Estereogramas com planos e densidade de polos de falhas e fraturas registradas durante o trabalho de campo.....	86
Figura 41 – Estereograma e diagrama de roseta representando as atitudes de planos de falha e fratura medidas durante o trabalho de campo.....	87
Figura 42 – Classes de litologia utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado	88
Figura 43 – Mapa de lineamentos traçados na área de estudo.....	89
Figura 44 – Diagramas de roseta mostrando as principais direções dos lineamentos identificados na área de estudo.....	89
Figura 45 – Diagramas de roseta com as direções de lineamentos nas três grandes unidades geológicas presentes na área de estudo	90
Figura 46 – Falhas e fraturas mapeadas e fotointerpretadas na região da área de estudo	90
Figura 47 – Classes de distância de estruturas utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado	91
Figura 48 – Classes de altitude utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado	92
Figura 49 – Classes de declividade utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo.....	94
Figura 50 – Classes de orientação das encostas utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo.....	95
Figura 51 – Diagramas de roseta do número de deslizamentos registrados e graus de pertinência das classes de orientação das encostas	96
Figura 52 – Classes de uso e ocupação do solo utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado	97
Figura 53 – Distribuição de áreas das classes de suscetibilidade nos mapas gerados.....	98
Figura 54 – Curvas ROC para os mapas de suscetibilidade a deslizamentos.....	99
Figura 55 – Gráfico de valores de AUC para os mapas de suscetibilidade gerados	99
Figura 56 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa no município de Ascurra, utilizando-se $\gamma = 0,825$	100
Figura 57 – Gráfico mostrando a relação entre as classes de declividade e seus graus de pertinência à análise de suscetibilidade a deslizamentos.....	102

Figura 58 – Gráfico de comparação entre o número total de deslizamentos em cada classe de distância de falhas e seu grau de pertinência calculado.....	104
Figura 59 – Gráfico de comparação entre o número total de deslizamentos em cada classe de altitude e seu grau de pertinência calculado	105
Figura 60 – Suscetibilidade a deslizamentos na microbacia do Ribeirão São Paulo	106
Figura 61 – Suscetibilidade a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Guaricana	106
Figura 62 – Distribuição dos 96 movimentos de massa mapeados entre as diferentes microbacias que compõem a área de estudo.....	107
Figura 63 – Mapa de situação da localidade de Ribeirão Oitenta frente à suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de gatilhos de deslizamentos e processos naturais e antrópicos envolvidos.	40
Tabela 2 – Classificação simplificada de movimentos gravitacionais de massa conforme Varnes (1978).	42
Tabela 3 – Classificação de Hungr, Leroueil e Picarelli (2014) para movimentos gravitacionais de massa.....	42
Tabela 4 – Graus de pertinência das classes de litologia.....	88
Tabela 5 – Graus de pertinência das classes de distância de falhas.	91
Tabela 6 – Graus de pertinência das classes de altitude.	93
Tabela 7 – Graus de pertinência das classes de declividade.....	94
Tabela 8 – Graus de pertinência das classes de orientação das encostas.	96
Tabela 9 – Graus de pertinência das classes de uso e ocupação do solo.	97
Tabela 10 – Matriz de erro de classificação (matriz de confusão).	97

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
1.2. JUSTIFICATIVA	17
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
2.1. LOCALIZAÇÃO	19
2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	20
2.2.1. Complexo Granulítico de Santa Catarina	22
2.2.2. Bacia do Itajaí.....	24
2.2.3. Bacia do Paraná	27
2.2.4. Estruturas Geológicas da Região	29
2.2.5. Geologia da Região de Ascurra.....	33
2.3. CLIMA.....	35
2.4. HIDROGRAFIA	36
2.5. GEOMORFOLOGIA.....	38
2.6. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	38
3. REVISÃO CONCEITUAL	40
3.1. DESLIZAMENTOS OU MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	40
3.2. CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	41
3.2.1. Escorregamentos	43
3.2.2. Corridas	45
3.2.3. Quedas	46
3.2.4. Rastejos	47
3.3. FATORES CONDICIONANTES DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	47
3.3.1. Condicionantes Geológicos	48
3.3.2. Condicionantes Geomorfológicos	48
3.3.3. Ação antrópica	49
3.3.4. Cobertura vegetal	49

3.3.5. Pluviosidade	49
3.4. SUSCETIBILIDADE, PERIGO, AMEAÇA, RISCO E VULNERABILIDADE	50
3.5. INVENTÁRIOS DE DESLIZAMENTOS	51
3.6. LÓGICA <i>FUZZY</i>	52
4. ESTUDOS SOBRE DESLIZAMENTOS NO VALE DO ITAJAÍ	53
5. MATERIAIS E MÉTODOS	57
5.1. MATERIAIS.....	57
5.2. METODOLOGIA.....	58
5.2.1. Seleção dos Fatores Condicionantes para Análise de Suscetibilidade	59
5.2.2. Preparação dos Dados	59
5.2.3. Altitude, declividade e orientação das encostas	61
5.2.4. Litologia	62
5.2.5. Atualização do Inventário de Deslizamentos	62
5.2.6. Traçado de Lineamentos e Estruturas Planares	64
5.2.7. Classificação de Uso e Ocupação do Solo	65
5.2.8. Trabalhos de Campo	67
5.2.9. Definição das Classes dos Fatores Condicionantes	68
5.2.10. Cálculo dos Graus de Pertinência das Classes	68
5.2.11. Integração dos Dados com o Operador <i>Fuzzy Gamma</i>	70
5.2.12. Validação dos Resultados da Integração	71
5.2.13. Elaboração dos Mapas de Suscetibilidade a Deslizamentos	72
6. RESULTADOS	73
6.1. INVENTÁRIO DE DESLIZAMENTOS	73
6.1.1. Deslizamentos Identificados Remotamente	73
6.1.2. Deslizamentos Identificados em Campo	74
6.1.3. Deslizamentos Obtidos de Outros Trabalhos	77
6.1.4. Conformação Final do Inventário de Deslizamentos	77
6.1.5. Pontos de Treinamento e Validação	78
6.2. INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS EM CAMPO	78
6.2.1. Gnaisses do Complexo Granulítico de Santa Catarina	79

6.2.2. Arenitos da Formação Gaspar.....	80
6.2.3. Arenitos e Conglomerados da Formação Garcia	80
6.2.4. Siltitos e Arenitos Laminados da Formação Garcia	81
6.2.5. Granitoides	83
6.2.6. Vulcânicas Félsicas da Formação Apiúna	84
6.2.7. Folhelhos da Bacia do Paraná.....	84
6.2.8. Falhas e fraturas.....	85
6.3. GRAUS DE PERTINÊNCIA E ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES..	87
6.3.1. Litologia	87
6.3.2. Distância de Estruturas	89
6.3.3. Altitude.....	92
6.3.4. Declividade.....	93
6.3.5. Orientação das Encostas.....	95
6.3.6. Uso e Ocupação do Solo.....	96
6.4. MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS	98
7. DISCUSSÕES	101
8. CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
APÊNDICE 1 – MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS	119

1. INTRODUÇÃO

Movimentos gravitacionais de massa são deslocamentos de solo, rochas e/ou vegetação ao longo de uma vertente sob ação da gravidade, que ocorrem principalmente em cadeias montanhosas sismicamente ativas e com elevados índices de precipitação, mas que também estão frequentemente associados a relevos colinosos constituídos por rochas sedimentares de baixa resistência (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015; PANEK, 2020). Apesar disso, esses processos ocorrem com ampla distribuição geográfica, e a maioria dos países sofre com alguma forma de movimento de massa, seja de origem natural ou influenciada pela ação humana. Isso se deve à vasta gama de mecanismos que podem desencadear esses processos, como precipitações intensas ou prolongadas, terremotos, incêndios florestais, etc. (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Quando ocorrem em áreas habitadas, os movimentos gravitacionais de massa podem causar danos sociais e econômicos severos, como exemplificado pelos desastres de 2008 no Morro do Baú, em Santa Catarina, que resultou em 47 mortes, 4 desaparecimentos e 526 pessoas desabrigadas (ARAÚJO *et al.*, 2017) e de 2009-2010 no estado do Rio de Janeiro, que provocou a morte de 53 pessoas e deixou várias pessoas desabrigadas (LEITE, PINHEIRO e PAMBOUKIAN, 2019). No Brasil, esses desastres estão associados geralmente a eventos de precipitação intensa e prolongada, especialmente nos períodos que correspondem ao verão (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015).

Highland e Bobrowsky (2008) afirmam que é possível estimar os tipos, frequência de ocorrência, extensão e consequências de deslizamentos através do estudo dos fatores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos que causaram tais processos em eventos pretéritos, e que a ação antrópica é capaz de criar ou aumentar a suscetibilidade de uma área à ocorrência de deslizamentos. A disponibilidade de dados ambientais georreferenciados a respeito desses fatores condicionantes favoreceu, nos últimos anos, a aplicação de uma grande variedade de técnicas de inferência espacial a partir de produtos cartográficos e de sensoriamento remoto, integrados em ambiente SIG, para zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos (SILVA JR. *et al.*, 2016). Dentre as técnicas utilizadas, é possível citar os modelos por lógica *fuzzy*, relação de frequência, regressão logística e pesos de evidência.

O presente estudo se propõe a realizar uma análise da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Ascurra, Santa Catarina, através da aplicação de lógica *fuzzy* e relação de frequência. O método da lógica *fuzzy* tem como características a sua facilidade de

entendimento e aplicação, a possibilidade de uso de dados de qualquer escala de medição e o fato de que a ponderação dos pesos de fatores condicionantes é controlada pelo especialista (LEE, 2007). A relação de frequência, por sua vez, é um método estatístico baseado em dados, que correlaciona a probabilidade de ocorrência de um fenômeno com eventos pretéritos, e sua utilização ajuda a diminuir a subjetividade na atribuição dos pesos (CORREIA, 2015).

A área de estudo está localizada no Vale do Itajaí – que tem sido afetado continuamente por desastres naturais nas últimas décadas, especialmente inundações e deslizamentos – e ainda carece de estudos dessa natureza. Geologicamente, a região está posicionada no limite entre as rochas metamórficas paleoproterozoicas do Complexo Granulítico de Santa Catarina e as rochas vulcânicas e sedimentares da Bacia do Itajaí, sendo recoberta em sua porção oeste pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná, e seu relevo é condicionado pela interação de estruturas geológicas presentes nessas três unidades.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa no município de Ascurra (SC).

1.1.2. Objetivos Específicos

- Atualizar o inventário de deslizamentos do município de Ascurra (SC);
- Elaborar um mapa de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, em escala 1:50.000, para a área de estudo;
- Identificar áreas com maior ocorrência de movimentos de massa;
- Analisar a relação entre as características físicas da área de estudo e a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa.

1.2. JUSTIFICATIVA

Nas últimas duas décadas, mais de 7 mil desastres naturais foram registrados no mundo, sendo responsáveis por cerca de 1,23 milhões de mortes, mais de 4 bilhões de pessoas afetadas e cerca de 2,97 trilhões de dólares em perdas econômicas. Esse número de desastres representa um aumento de cerca de 74,4% em relação aos anos de 1980 a 1999 (CRED, 2020). No Brasil, a frequência de ocorrência de desastres naturais teve aumento a partir do ano de 2001, e os anos de 2010-2012 englobam 22% dos desastres ocorridos entre 1991 e 2012 (CEPED UFSC, 2013).

Os deslizamentos foram os desastres com maior crescimento de casos entre as décadas de 1990 e 2000, com um aumento de mais de 20 vezes, e causaram 15,6% das mortes por desastres naturais no país. Embora parte desse aumento possa ser relacionada a uma maior facilidade de aquisição de dados em anos recentes, Kobiyama *et al.* (2006) indicam sua relação com o aumento da população, a ocupação desordenada e o intenso processo de urbanização.

No estado de Santa Catarina, entre 1991 e 2012, foram oficialmente registrados 33 desastres naturais ligados a deslizamentos, sendo a região do Vale do Itajaí a mais afetada por esses eventos. Essas ocorrências estão naturalmente relacionadas à localização geográfica do estado, que permite a entrada da umidade vinda do Oceano Atlântico, e à presença da escarpa da Serra Geral Catarinense, paralela à linha de costa, que barra a passagem da umidade para o interior do continente, causando a deflagração de chuvas na região (CEPED UFSC, 2013). O desastre de maiores proporções da história do estado ocorreu no ano de 2008, quando um evento pluviométrico extremo desencadeou a ocorrência de um grande número de deslizamentos, concentrados principalmente nas regiões do baixo e médio Vale do Itajaí (PARIZOTO, 2014).

Kobiyama *et al.* (2006) ressaltam que, embora seja impossível evitar a ocorrência de desastres naturais severos, é possível adotar medidas que minimizem seus impactos. Cada R\$ 1,00 investido em prevenção equivale a cerca de R\$ 25 a R\$ 30 de obras de reconstrução pós-desastre, e esse investimento pode ser aplicado na forma de medidas estruturais, que representam obras de engenharia caras e complexas, ou não-estruturais, que envolvem ações de planejamento e gerenciamento, como sistemas de alerta e zoneamentos ambientais. A elaboração de mapas de suscetibilidade é uma etapa fundamental do zoneamento, pois permite delimitar zonas com maior predisposição à ocorrência de um evento e identificar áreas de maior risco à população. Esses mapas fornecem uma base tanto para o planejamento urbano dos municípios, como também um direcionamento para o tratamento de áreas de risco.

No município de Ascurra – SC, área de enfoque deste trabalho e localizada em uma região com histórico de desastres naturais, uma delimitação de áreas de risco foi feita em caráter emergencial pelo Serviço Geológico do Brasil (HOELZEL e BELLETTINI, 2015). Apesar disso, não existem ainda estudos com foco na suscetibilidade a deslizamentos e na identificação dos fatores físicos. Dessa forma, espera-se que este trabalho possa complementar o conhecimento sobre os fatores condicionantes a esse tipo de processo na área de estudo e em regiões geológica e geomorfologicamente similares, além de prover aos órgãos administrativos do município uma base para um planejamento urbano mais seguro, ajudando a evitar possíveis perdas humanas e materiais no futuro.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo corresponde ao município de Ascurra, localizado na microrregião do Médio Vale do Itajaí, no estado de Santa Catarina, a cerca de 107 km da capital estadual, Florianópolis (Figura 1). O município compreende uma área de aproximadamente 111,67 km² e abriga uma população de 7.683 habitantes (SANTA CATARINA, 2021). Os principais acessos ao município são a rodovia BR-470, que liga a região ao litoral e ao interior do estado, e a SC-110, que leva a norte até a cidade de Jaraguá do Sul.

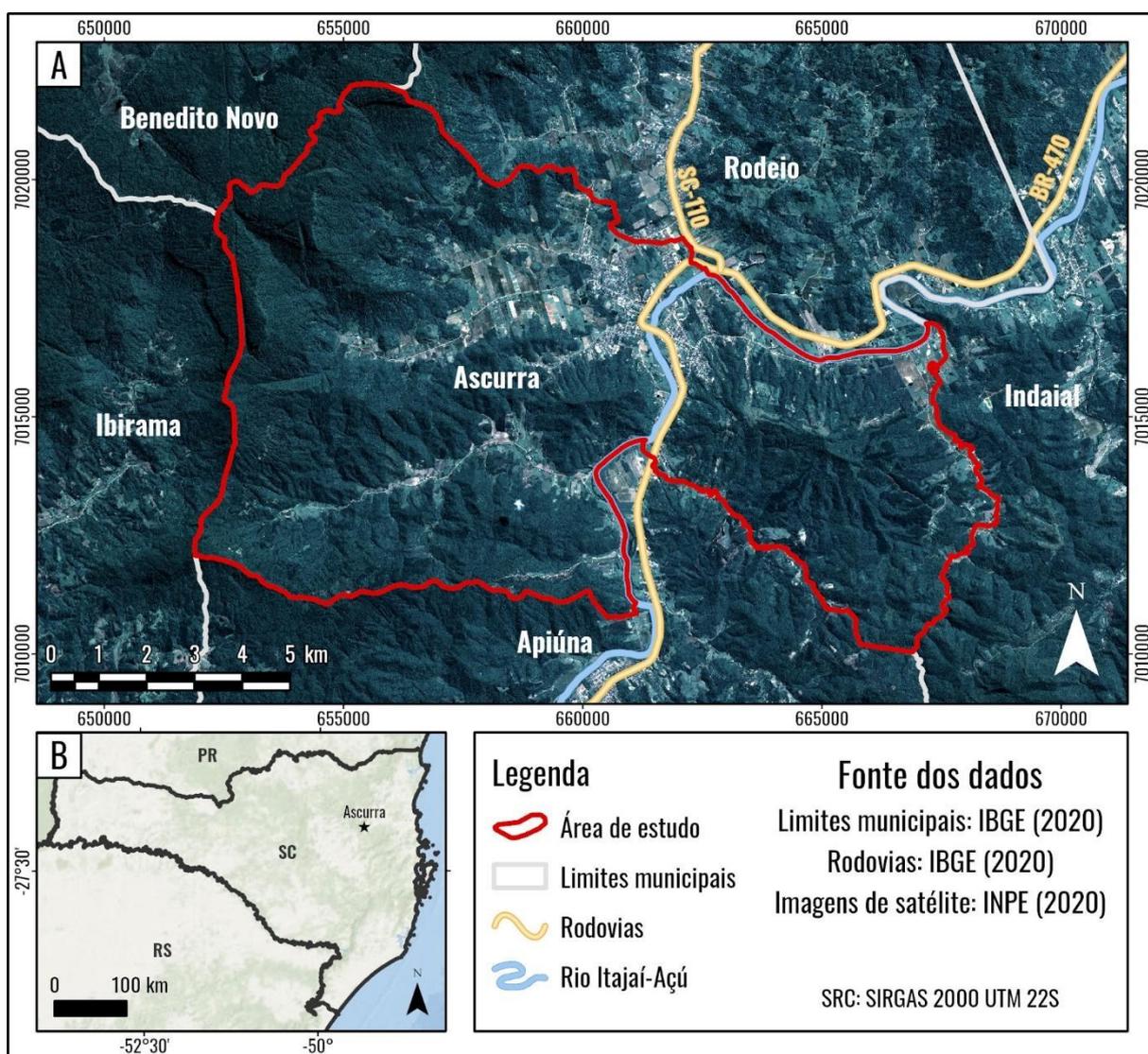


Figura 1 – Localização do município de Ascurra – SC. A) Localização em relação aos municípios vizinhos. B) Localização no estado de Santa Catarina. Fonte: elaborado pelo autor.

2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Província Mantiqueira é uma entidade geotectônica que representa um sistema orogênico neoproterozoico, desenvolvido durante a Orogenia Brasileiro-Pan Africana, que resultou na amalgamação do Gondwana Ocidental. Trata-se de uma faixa NNE-SSW que se estende por mais de 3000 km ao longo da costa do Atlântico, do sul do estado da Bahia até o Uruguai (Figura 2). Essa província engloba os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília Meridional, Dom Feliciano e São Gabriel (HEILBRON *et al.*, 2004; DELGADO *et al.*, 2003). No estado de Santa Catarina, a Província Mantiqueira é representada principalmente pelo Cinturão Dom Feliciano.

Segundo Basei *et al.* (2011b), o Cinturão Dom Feliciano é uma faixa de direção NE-SW com cerca de 1200 km de comprimento e 150 km de largura, que se estende do estado de Santa Catarina até o Uruguai (Figura 3). Ele é subdividido, de sudeste para noroeste, em três domínios tectônicos: um Cinturão de Granitoides (rochas graníticas cálcio-alcalinas e alcalinas com diferentes níveis de deformação), um Cinturão Metavulcanossedimentar (rochas sedimentares e ígneas metamorfizadas em fácies xisto verde e anfíbolito) e uma série de Bacias de *Foreland* (rochas sedimentares e vulcânicas anquimetamórficas). Essas unidades apresentam um transporte em direção aos terrenos a oeste (representados, em Santa Catarina, pelo Complexo Granulítico de Santa Catarina).

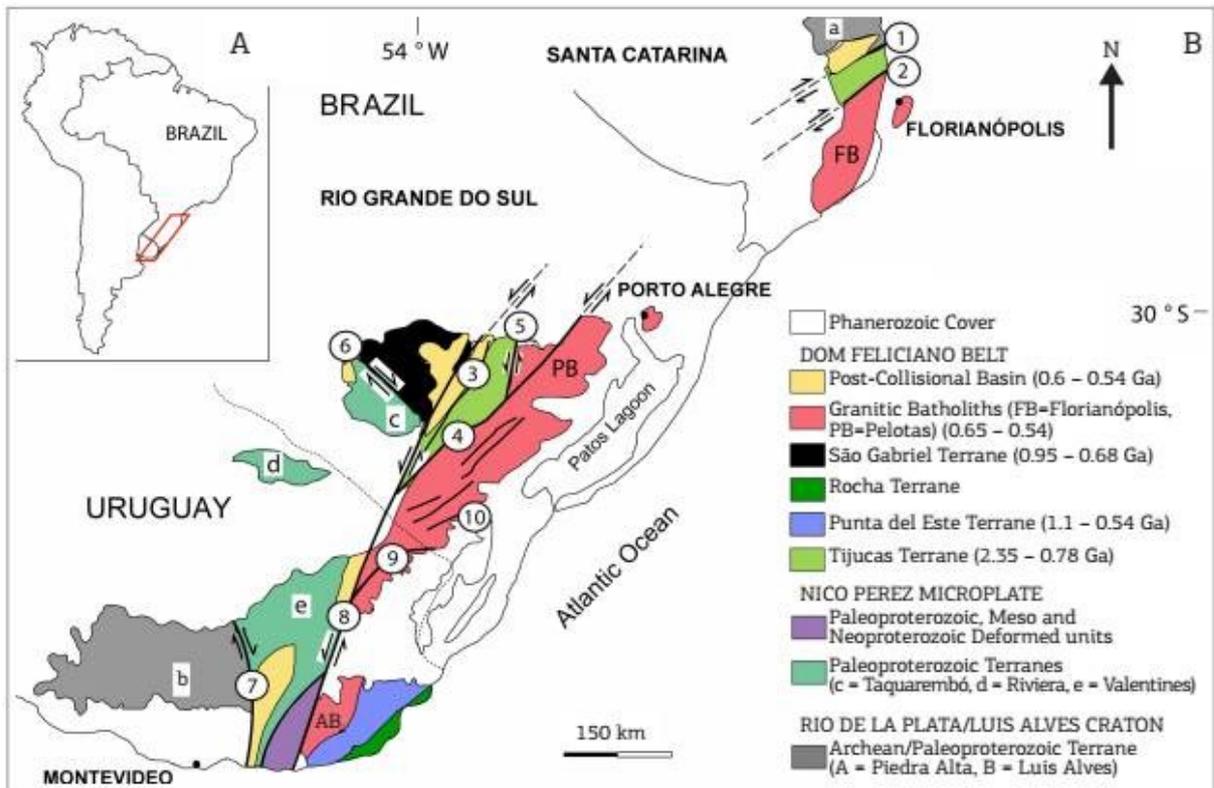


Figura 2 – Cinturão Dom Feliciano. Fonte: Philipp, Pimentel e Chemale Jr. (2016).

A estruturação geral do Cinturão Dom Feliciano segue a mesma direção de sua alongação, com os três domínios separados por grandes zonas de cisalhamento. Em Santa Catarina, os domínios interno e central são separados pela Zona de Cisalhamento Major Gercino, enquanto os domínios central e externo são limitados pela Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (BASEI *et al.*, 2011b). Conforme Heilbron *et al.* (2004), essa estruturação deu-se por conta de uma colisão continental oblíqua, estando associada a uma tectônica transpressiva de escape lateral que se desenvolveu ao longo das zonas de cisalhamento supracitadas. Embora existam diversos modelos para a evolução do Cinturão Dom Feliciano, muitos deles discordam em relação à vergência da subducção, número de eventos de subducção, placas envolvidas no processo e também quanto ao caráter alóctone ou autóctone do cinturão granítico (domínio interno) (DE TONI *et al.*, 2020).

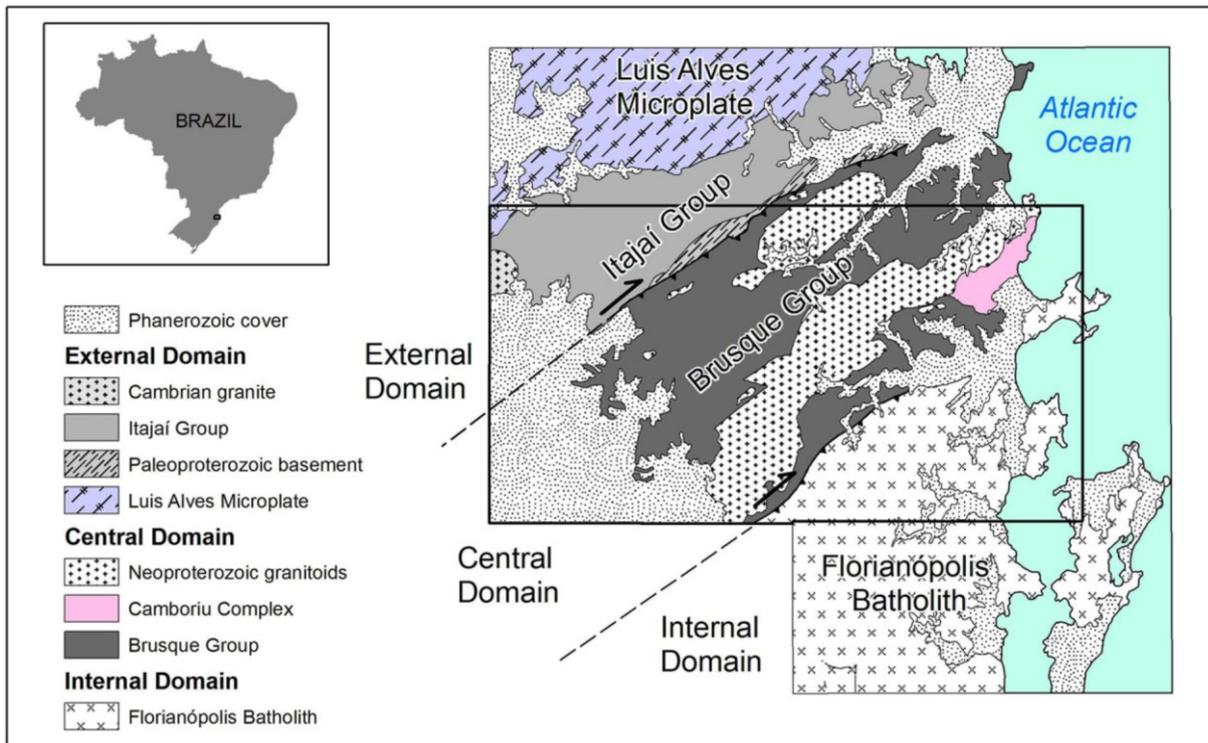


Figura 3 – Cinturão Dom Feliciano e seus domínios na porção leste de Santa Catarina. Fonte: Basei *et al.* (2011b).

2.2.1. Complexo Granulítico de Santa Catarina

O Complexo Granulítico de Santa Catarina (CGSC), também conhecido como Cráton Luiz Alves (KAUL, 1980), Microplaca Luís Alves (BASEI *et al.*, 1992), ou ainda Terreno Luis Alves (PASSARELLI *et al.*, 2010), é uma unidade metamórfica de alto grau (fácies granulito e anfíbolito) aflorante na porção norte do escudo catarinense, sendo constituída por ortognaisses tonalíticos, granodioríticos e trondhjêmíticos, intrudidos por rochas máficas e ultramáficas, com presença subordinada de quartzitos e formações ferríferas bandadas (HARTMANN, SILVA e ORLANDI FILHO, 1979). As rochas máficas-ultramáficas incluem piroxenitos, metagabronoritos, anfíbolitos e xistos magnesianos (BASEI, MCREATH e SIGA JR., 1998). Ele é limitado a sudeste pela Bacia do Itajaí, ao longo do Lineamento Blumenau, e a norte pelo Terreno Curitiba, ao longo da Zona de Cisalhamento Pien.

O CGSC representa a unidade mais antiga do escudo catarinense. Seu protólito teria sido formado em eventos magmáticos há 2,68 e 2,5 Ga, e então metamorfozizado ao longo de dois eventos de alto grau: o primeiro há cerca de 2,35 Ga e o segundo, responsável pela atual configuração do CGSC como um complexo metamórfico de alto grau (fácies granulito), há cerca de 2,18 Ga (HELLER *et al.*, 2021). Segundo Hartmann *et al.* (2000), o CGSC teria se estabilizado como cráton há 1,9 Ga. Seus domínios marginais (a sul) seriam bordas deformadas

cujo desenvolvimento originaria o Complexo Camboriú (GUADAGNIM *et al.*, 2010). Deformação e metamorfismo relacionados aos eventos do ciclo Brasileiro no CGSC estão basicamente limitados a processos cataclásticos ao longo de falhas nos limites com os terrenos adjacentes dos domínios Curitiba e Paranaguá e com o Cinturão Dom Feliciano, além de metamorfismo de baixo grau em algumas falhas regionais que cortam o CGSC (BASEI *et al.*, 1998).

Os litotipos mais comuns no CGSC são os gnaisses quartzo-feldspáticos, de coloração tipicamente cinza esverdeada (podendo variar de preto a cinza claro), granulometria fina a média e textura granulítica – com minerais (principalmente o quartzo) deformados e alongados segundo a foliação – ou, mais raramente, granoblástica. Sua mineralogia inclui principalmente quartzo e feldspatos, com predomínio de plagioclásio sobre ortoclásio. Os minerais máficos incluem hiperstênio, diopsídio, hornblenda, biotita e almandina, e os minerais acessórios são zircão, apatita, rutilo, magnetita e, raramente, pirrotita. Os ultramafitos, por sua vez, apresentam coloração preta a cinza escuro, granulometria média a grossa e textura granoblástica estando levemente foliados. Sua mineralogia principal constitui-se de hiperstênio, diopsídio e hornblenda, e, como acessórios, encontra-se plagioclásio cálcico, biotita e magnetita. Os **quartzitos** exibem coloração cinza amarronada, com intenso fraturamento e textura granoblástica. Além do quartzo, sua mineralogia também pode incluir magnetita e muscovita. O aumento do teor de magnetita nessas rochas gera uma gradação para formações ferríferas. As formações ferríferas bandadas (BIFs) apresentam coloração cinza escura a preta e estrutura foliada, com alternância de bandas de quartzo e magnetita. Exibem granulometria fina a média, com textura granoblástica. Sua mineralogia inclui principalmente quartzo e magnetita, com presença menos significativa de hematita, hiperstênio e óxidos de manganês. As rochas cálcio-silicatadas apresentam coloração variando entre preto, cinza claro e verde. Têm estrutura bandada, granulometria média e textura granoblástica. Localmente, ocorre textura nematoblástica, com orientação de hornblendas prismáticas segundo a direção das micas. A mineralogia inclui principalmente oligoclásio e microclínio, com presença menor de diopsídio-hedenbergita, hornblenda verde e biotita. Esses minerais ocorrem em bandas mono ou bi-minerálicas. Como acessórios, é possível encontrar quartzo, epidoto, alanita, apatita, esfeno e calcita (HARTMANN, SILVA e ORLANDI FILHO, 1979).

Segundo Basei (1985), há uma foliação bem desenvolvida na maioria das rochas do CGSC, embora incipiente nas rochas maciças, sendo caracterizada pelo alinhamento de minerais máficos e correspondendo ao bandamento dos níveis gnáissicos e de migmatitos

estromáticos encontrados localmente. A atitude dessa foliação é de direção predominantemente NE, com sentido e ângulo de caimento que variam conforme o litotipo.

2.2.2. Bacia do Itajaí

A Bacia do Itajaí é uma sucessão sedimentar clástica contendo rochas vulcânicas subordinadas, localizada na região de *foreland* do Cinturão Dom Feliciano, com idade de deposição entre 596 e 560 Ma (BASEI *et al.*, 2011a). É uma unidade limitada por falhas, alongada na direção ENE, estando posicionada sobre as rochas paleoproterozoicas do Complexo Granulítico de Santa Catarina e a noroeste das rochas metavulcanossedimentares neoproterozoicas do Complexo Metamórfico Brusque (CMB). O contato com o CGSC é controlado em grande parte pelo Lineamento Blumenau, enquanto que o contato com o CMB se dá através da Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP), que esteve ativa durante a deposição e deformação da bacia (GUADAGNIN *et al.*, 2010).

As rochas da Bacia do Itajaí foram reconhecidas pela primeira vez por Dutra (1926), que as incluiu na Série Itajaí, composta por folhelhos argilosos e argilo-arenosos, arenitos e conglomerados arcóseos. Maack (1947) subdividiu a Série Itajaí em: Formação Ibirama, na base, composta por xistos cinzentos, ardósias, quartzitos e lentes de conglomerados; e Formação Gaspar, no topo, composta por conglomerados, arenitos e folhelhos. Essas unidades estariam sobrepostas, em discordância, por conglomerados da Formação Blumenau.

Salamuni, Bigarella e Takeda (1961), por sua vez, subdividiram a Série Itajaí em Formação Garcia, na base – composta por arenitos, folhelhos siltico-arenosos intercalados com arenitos conglomeráticos, conglomerados e rochas vulcânicas –, e Formação Gaspar, no topo – composta por conglomerados com arenitos arcóseos subordinados. Posteriormente, Schulz Jr., Albuquerque e Giffoni (1969) e Kaul (1976) adotaram a nomenclatura de Grupo Itajaí para as rochas da bacia.

Silva e Dias (1981) propuseram a inversão das unidades da Bacia do Itajaí, propondo a Formação Gaspar – composta por arenitos arcóseos grossos, arenitos bordôs finos com intercalações de tufos ácidos – como unidade basal e a Formação Campo Alegre – composta por intercalações de siltitos e arenitos com vulcânicas ácidas subordinadas – como unidade de topo.

Basei (1985) subdividiu as rochas da bacia em uma Unidade Arenítica Inferior, correspondente à Formação Gaspar de Silva e Dias (1981) – caracterizada por arenitos bordôs maciços com lentes de conglomerados e tufos vulcânicos associados – e uma Unidade Siltica

Superior – caracterizada por fácies mais finas, com alternância de siltitos e arenitos na base e de siltitos e argilitos no topo.

Krebs, Caldasso e Lopes (1988) subdividiram as rochas da Bacia do Itajaí em Domínio I, na base – composta por arenitos e conglomerados de leques aluviais (Ass. de fácies 1), pelitos, arenitos e arenitos conglomeráticos de frente deltaica (Ass. de fácies 2), arenitos e pelitos turbidíticos (Ass. de fácies 3), conglomerados e arenitos conglomeráticos turbidíticos (Ass. de fácies 4) e pelitos e arenitos finos turbidíticos (Ass. de fácies 5) – e Domínio II, indiferenciado, devido à alta complexidade da deformação observada nos estratos.

Appi e Souza Cruz (1990) agruparam as unidades da Bacia do Itajaí em Sequência Inferior Continental, correspondente à Formação Gaspar de Silva e Dias (1981) – composta por conglomerados polimíticos de matriz arenosa e arenitos grossos a finos – e Sequência Superior Subaquosa Bacial, correspondente à Formação Campo Alegre de Silva e Dias (1981) – composta por arenitos e pelitos de sistemas turbidíticos. Rostirolla, Alkmim e Soares (1992), por sua vez, propõem uma subdivisão em quatro associações de fácies para essas sequências (Figura 4): Associação de Fácies A – correspondente à Sequência Inferior Continental –, Associações de Fácies B e C – correspondentes à Sequência Superior Subaquosa Bacial – e Associação de Fácies D – composta por depósitos deltaicos. Conforme Rostirolla *et al.* (1999), essas associações de fácies são compostas por:

- Associação de fácies A: Arenitos e conglomerados avermelhados, com ocorrência subordinada de arenitos muito finos, siltitos e folhelhos escuros. A seção basal dessa associação representa uma sedimentação continental, gradando para uma plataforma rasa em direção ao topo.
- Associação de fácies B: Ritmitos de areia-silte, arenitos maciços ou estratificados, conglomerados, arenitos conglomeráticos e *drapes* de lama. A arquitetura de fácies sugere que trata-se de deposição turbidítica.
- Associação de fácies C: Depósitos de finos, predominantemente folhelhos, ritmitos e siltitos laminados cinzentos. A deposição desses siltitos e folhelhos representa a porção distal da associação de *fan* delta (D), e a transição entre as duas associações se dá através de um espessamento gradativo em direção ao topo.
- Associação de fácies D: Conglomerados avermelhados, arenitos e lamas, com siltitos cinzentos e arenitos finos na base, representando depósitos de *fan* deltas.

Essas unidades são intrudidas pelo Riolito Apiúna (567 ± 41 Ma) – na forma de três *stocks* e vários diques e *necks* – e pelo Granito Subida (561 ± 42 Ma), na forma de um *stock* (GUADAGNIN *et al.*, 2010).

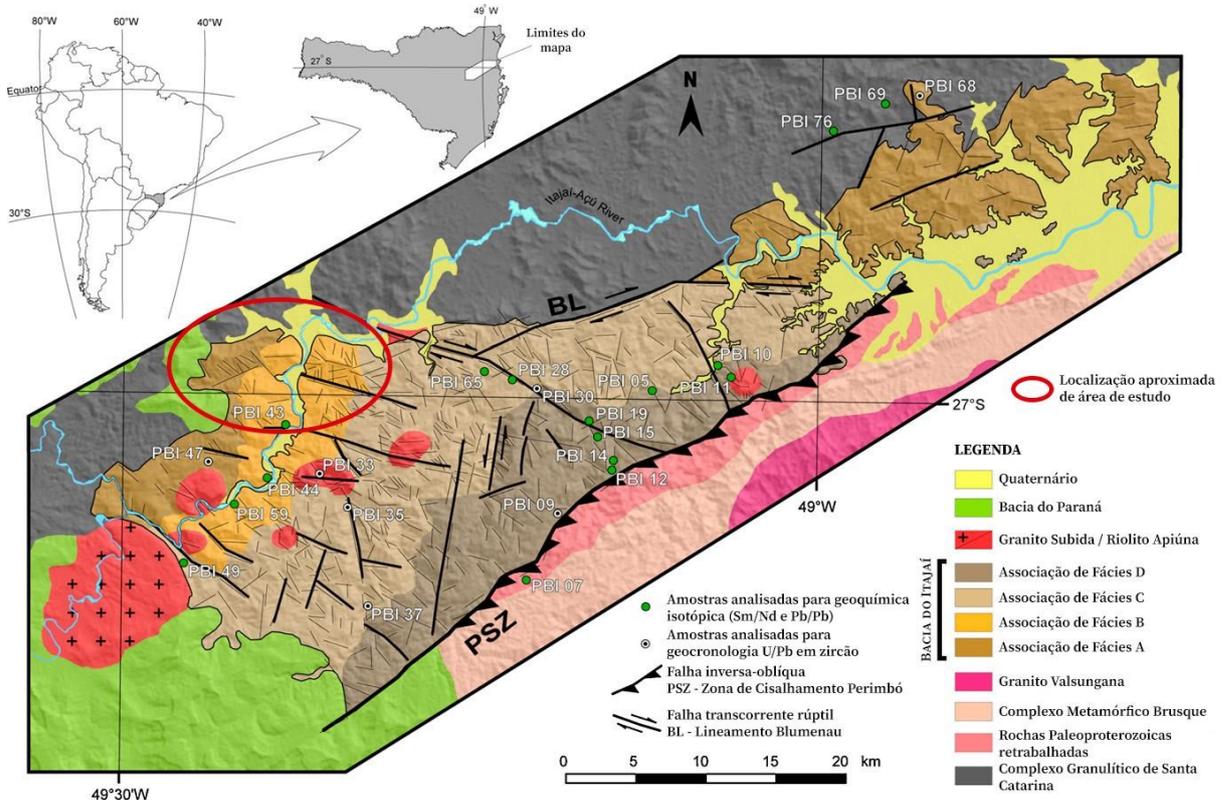


Figura 4 – Mapa geológico da Bacia do Itajaí, com indicação da localização aproximada da área de estudo em vermelho. Modificado de Guadagnin *et al.* (2010).

Iglesias *et al.* (2011), por outro lado, subdividem a Bacia do Itajaí, da base para o topo, em: Formação Gaspar (arenitos, conglomerados e tufos), Formação Garcia (siltitos, arenitos rítmicos e conglomerados) e Formação Apiúna (rochas vulcânicas félsicas). Essa mesma divisão é adotada por CPRM (2014), com algumas variações.

Já Basei *et al.* (2011a) subdividem a bacia, da base para o topo, em: Formação Baú (conglomerados, arenitos médios a conglomeráticos e tufos vulcânicos de origem continental), Formação Ribeirão Carvalho (ritmitos de sistemas turbidíticos proximais), Formação Ribeirão Neisse (arenitos arcoseanos em contato gradacional com as rochas da formação subjacente), Formação Ribeirão do Bode (siltitos laminados alternando com camadas silto-argilosas contendo níveis silto-arenosos) e Formação Apiúna (rochas riolíticas). Esses autores também apontam para a colocação das unidades de base da bacia sobre as outras unidades em sua porção sul, devido à ação de dobras causadas pelo cavalgamento do Grupo Brusque sobre o Grupo Itajaí ao longo da ZCIP.

Segundo Guadagnin *et al.* (2010) e Basei *et al.* (2011a), os sedimentos da base da Bacia do Itajaí têm proveniência relacionada principalmente ao CGSC e ao Cinturão Dom Feliciano. A contribuição de sedimentos cratônicos diminui em direção ao topo da bacia, conforme aumenta a contribuição de sedimentos provenientes do cinturão.

A Bacia do Itajaí é interpretada por Rostirolla *et al.* (1999) e Basei *et al.* (2011a) como uma bacia de antepaís (*foreland*) periférica. Guadagnin *et al.* (2010) admitem pelo menos duas interpretações para esse cenário: uma bacia de antepaís relacionada à orogenia ou uma bacia transpressiva, formada em estágio tardi- a pós-tectônico. Almeida *et al.* (2010), por outro lado, afirmam que não há evidências claras que suportem uma origem sintectônica.

Rostirolla *et al.* (1999), Schroeder (2006), Basei *et al.* (2011a) e diversos outros autores reconhecem duas fases distintas de deformação para a Bacia do Itajaí. Segundo Rostirolla *et al.* (1999), as principais estruturas geradas na primeira fase (D₁) seriam dobras assimétricas, zonas de cisalhamento rúpteis paralelas ao acamamento nos flancos das dobras, falhas contracionais e transcorrentes, e, localmente, falhas extensionais, enquanto a segunda fase (D₂) seria representada pela inversão do campo de stress, com reativação de falhas e dobras sobrepostas. Schroeder (2006), chegou a uma conclusão similar, constatando que o primeiro evento de deformação teria sido o grande responsável pela deformação da bacia, enquanto que eventos posteriores teriam ocorrência restrita, limitando-se basicamente a inversões da cinemática de falhas geradas anteriormente.

Conforme Basei *et al.* (2011a), a Bacia do Itajaí foi afetada por duas fases de dobramento cilíndrico. A primeira e mais intensa (D₁), apresenta orientação axial entre E-W e NE-SW (paralela à alongação da bacia e à frente de cavalgamento na ZCIP) e vergência preferencial para NW, estando relacionada ao cavalgamento do Complexo Metamórfico Brusque sobre a bacia. Essa fase é representada por dobras amplas e abertas, na forma de sinformas e antiformas com planos axiais verticais, que gradam para falhas inversas em direção à porção sul da bacia. A segunda fase (D₂) é representada por dobras amplas e descontínuas com orientação axial aproximadamente N-S e caimento leve para sul.

2.2.3. Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar que cobre partes do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai. Ela possui uma forma vagamente alongada na direção N-S, e sua área total é estimada em 1,5 milhões de quilômetros quadrados, compreendendo um pacote sedimentar-magmático de até 7 mil metros de espessura máxima. Estratigraficamente, a Bacia

do Paraná pode ser dividida em seis Supersequências (Figura 5), separadas por discordâncias inter-regionais: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). Destas, as três primeiras correspondem a sucessões sedimentares representando ciclos transgressivo-regressivos relacionados a variações no nível relativo do mar, enquanto que as demais representam pacotes de rochas sedimentares continentais com rochas ígneas associadas (MILANI *et al.*, 2007).

O registro dessas Supersequências compreende fases de acumulação sedimentar intercaladas com períodos de erosão em grande escala, sendo a evolução de cada unidade condicionada por contextos climáticos e tectônicos distintos. A Supersequência Rio Ivaí está relacionada à implantação da Bacia do Paraná, e a orientação NE-SW de seus depocentros sugere um controle por mecanismos de rifteamento. A Supersequência Paraná pode ser correlacionada a períodos de afogamento marinho das áreas cratônicas do Gondwana. Na Supersequência Gondwana I, por outro lado, passam a predominar condições de bacia intracratônica. As rochas magmáticas da Formação Serra Geral (Supersequência Gondwana III) estão ligados às fases iniciais de rifteamento e ruptura do supercontinente, e a cobertura continental da Supersequência Bauru encerra o registro sedimentar da Bacia do Paraná (MILANI *et al.*, 1998).

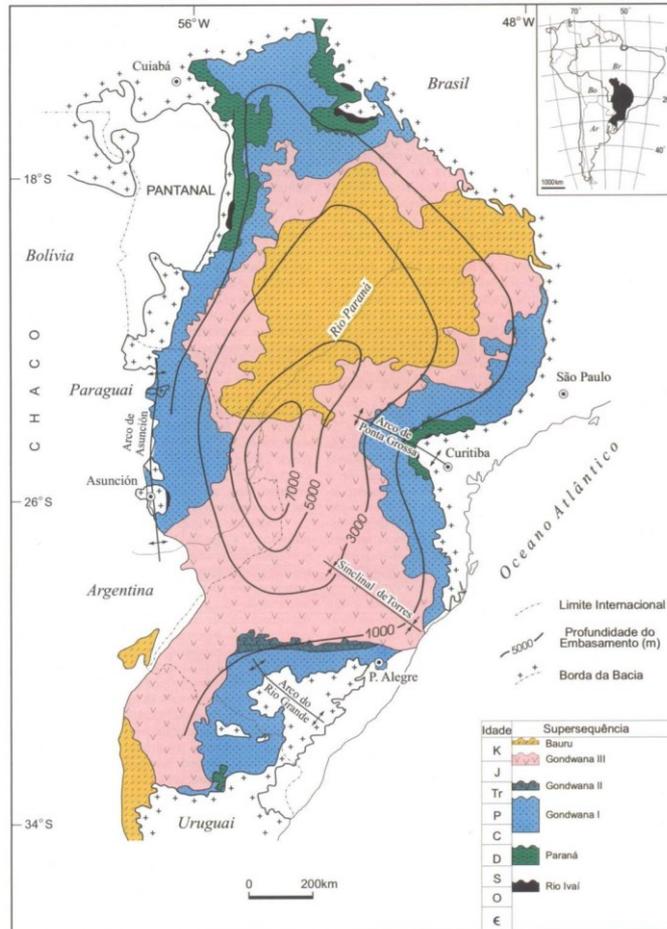


Figura 5 – Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná e distribuição temporal das Superseqüências. Fonte: Milani (2004).

2.2.4. Estruturas Geológicas da Região

Separando os domínios externo (Bacia do Itajaí) e central (Complexo Metamórfico Brusque) do Cinturão Dom Feliciano (BASEI *et al.*, 2011b), ocorre a chamada Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP), também conhecida como Lineamento Itajaí-Gaspar (SILVA e DIAS, 1981), Zona de Transcorrência Itajaí-Perimbó (SILVA, 1991), Lineamento Perimbó, dentre outras denominações. Trata-se de uma zona de cisalhamento de orientação NW-SE, com até 5 km de largura e mais de 60 km de extensão no Escudo Catarinense (HADLICH, 2015).

Silva (1991) descreve a ZCIP como uma estrutura de caráter rúptil, que transpõe as rochas do Complexo Metamórfico Brusque, juntamente com partes do embasamento granito-gnáissico, contendo uma componente tangencial sobreposta por uma fase transcorrente. Biondi, Schicker e Bugalho (1992), em estudo das mineralizações encontradas na região, concluíram que a tectônica geradora dessa zona de cisalhamento iniciou-se com uma fase compressiva com

esforços NE-SW, que reativou falhas do embasamento e gerou um sistema transpressivo nas rochas da Bacia do Itajaí, seguida por um relaxamento dos esforços, que gerou um sistema transtensivo. Já Biondi e Xavier (2002) consideram para a zona de cisalhamento uma fase acrescional, resultando em tectônica de baixo ângulo, seguida por uma fase colisional, resultando em tectônica direcional de alto ângulo. Schroeder (2006, p. 27), por sua vez, descreve a ZCIP como uma estrutura com padrão entrelaçado, na qual “ocorre milonitização transcorrente dúctil a dúctil-rúptil sobre as rochas granulíticas e metavulcanossedimentares, com geração de milonitos, ultramilonitos e filonitos, embora possua também um caráter rúptil”, e afirma que a cinemática da falha principal corresponde a uma transpressão, com componente lateral sinistral e vertical inversa. Ronchi (2014), por outro lado, através de estudo do Granito Parapente como marcador reológico da evolução da ZCIP, determinou que a estrutura teria funcionado primeiramente como um cavalgamento com transporte de SE para NW, passando, em seguida, para uma falha transcorrente destal.

O Lineamento Blumenau, por sua vez, é uma zona rúptil de transcorrência destal, com direção geral N70E, que representa uma das estruturas mais importantes da região. Embora não possua evidências superficiais tão claras quanto às da ZCIP, o Lineamento Blumenau condiciona parte do limite norte da Bacia do Itajaí, colocando suas unidades em contato com o CGSC (SILVA e DIAS, 1981).

Segundo Silva e Dias (1981), existem também outros dois *trends* regionais de estruturas na região da Bacia do Itajaí, com ocorrência mais restrita. Um deles possui direção N20-30E e o outro direção N40-60W. Este último promove um arranjo escalonado de blocos, influenciando, em alguns pontos, o curso do Rio Itajaí-Açu. Essas estruturas (N40-60W) podem ser visualizadas nos mapas geológicos e estruturais elaborados por Rostirolla *et al.* (1999), Schroeder (2006) e Guadagnin *et al.* (2010), sendo interpretadas como falhas transcorrentes destrais. Uma dessas falhas é identificada por Rostirolla *et al.* (1999) como “Falha de Ascurra” e por Schroeder (2006) como “Falha de Warnow-Encano Alto”, atravessando o limite nordeste do município de Ascurra e desviando o curso do Rio Itajaí-Açu em um meandro estrutural.

Krebs *et al.* (1990), por sua vez, identificaram as principais estruturas presentes na Bacia do Itajaí como:

- Sistema transcorrente principal (ZCIP), de direção N50-60E;
- Fraturas/falhas sintéticas (R), de direção N35-45E;
- Fraturas/falhas antitéticas (R'), de direção N15-25W;
- Fraturas de extensão (T), de direção N5-15E;

- Fraturas simétricas de R (P), de direção N65-75E; e
- Fraturas simétricas de R' (X), de direção N45-55W.

Esses autores destacam, ainda, a presença de dobras escalonadas, acilíndricas, não planas, com superfície axial cilíndrica ou acilíndrica e vergência para NNW.

Rostirolla *et al.* (1992) apud Schroeder (2006) identificaram, na Bacia do Itajaí, estruturas relacionadas a duas fases distintas de deformação. A primeira, de caráter compressivo e tensão principal direcionada de SE para NW, desenvolveu falhas de cavalgamento de direção N60-70E, dobras assimétricas com vergência para NW e um sistema conjugado de falhas transcorrentes de direção N10-20E (sinistras) e N80-90W (destras) (Figura 6). A segunda fase, de caráter distensivo, teria invertido a cinemática das estruturas geradas pelo evento anterior.

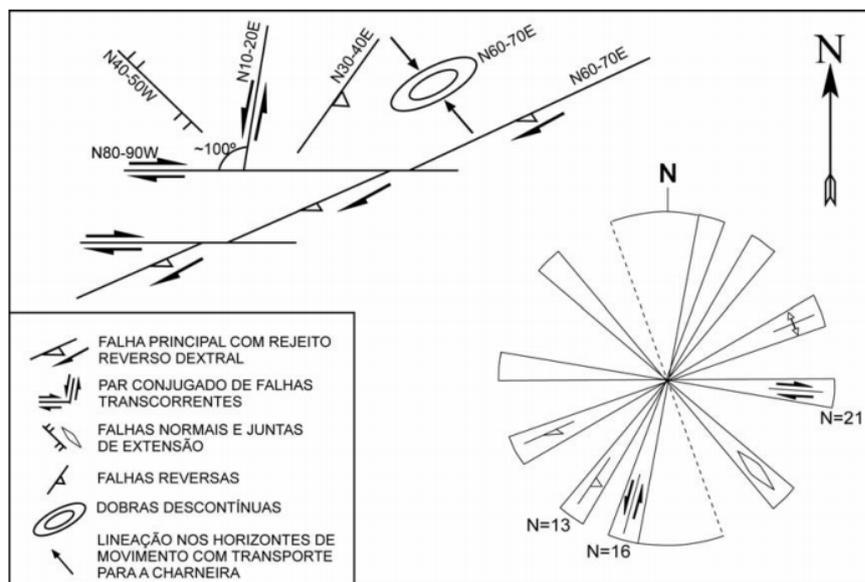


Figura 6 – Relação espacial das estruturas da primeira fase de deformação da Bacia do Itajaí. Fonte: Rostirolla *et al.* (1992).

Segundo Biondi, Schicker e Bugalho (1992), em estudo de mineralizações presentes no limite norte da Bacia do Itajaí, são constatados três grupos de falhas com orientações distintas na região. Sobre a bacia, a principal orientação das falhas é N70-90E. O contato NW do embasamento com os sedimentos da Bacia do Itajaí, na área, é dado pelo segundo grupo de falhas, com orientação N0-20E e movimentação sinistral, que são comuns tanto na área da bacia quanto no embasamento. O terceiro e último grupo de falhas possui orientação N60-80W, e também ocorre tanto nas rochas da bacia quanto no embasamento.

Schroeder (2006), em amplo estudo das estruturas da Bacia do Itajaí, mapeou as principais direções e cinemáticas das falhas encontradas na bacia e no embasamento próximo (Figura 7). Destaca-se a presença de falhas transcorrentes de direção WNW e NNE, destras e

sinistras respectivamente, que corresponderiam a falhas escalonadas R' e R no modelo de Riedel, originadas no primeiro evento de deformação. O segundo evento de deformação da bacia teria sido responsável pela geração de falhas transcorrentes de direção NW, aparentemente sinistras, assim como pela inversão da cinemática de falhas transcorrentes, originalmente sinistras, com direção ENE.

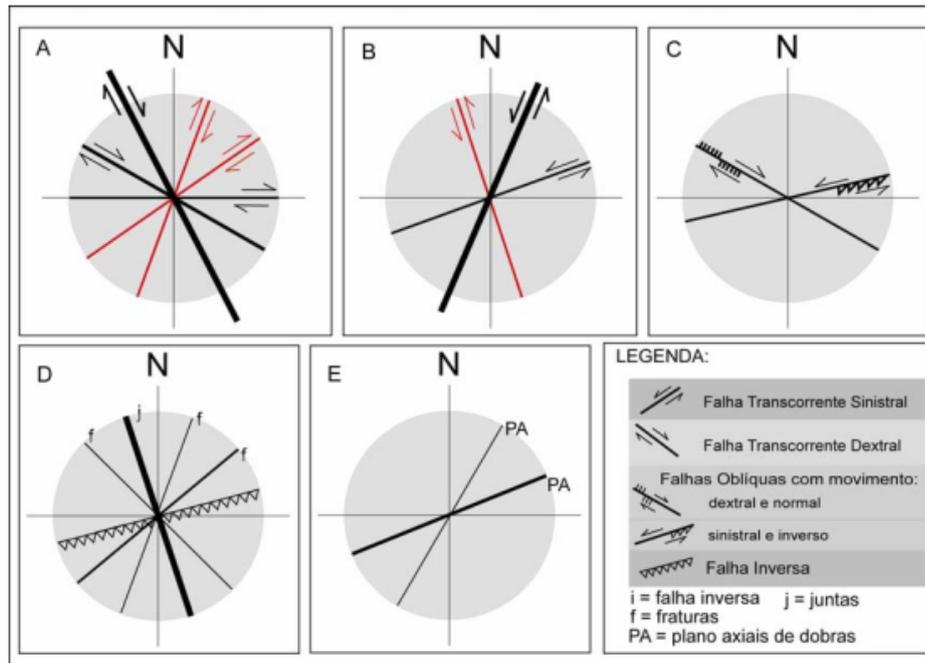


Figura 7 – Direções preferenciais de ocorrência das principais estruturas da Bacia do Itajaí e embasamento próximo. Direções com maior frequência de ocorrência são retratados com traço mais espesso. A) Falhas transcorrentes dextrais. B) Falhas transcorrentes sinistras. C) Falhas oblíquas. D) Fraturas e juntas. E) Dobras. Fonte: Schroeder (2006).

Na Bacia do Paraná, segundo Zalán *et al.* (1990), dois importantes estilos estruturais estão presentes: (a) deformações associadas a intrusões magmáticas, representadas principalmente por grandes estruturas NW-SE, que serviram como conduto para a colocação de diques básicos durante a ruptura do Gondwana, e (b) deformações associadas a reativações tectônicas de estruturas do embasamento, principalmente de direção NE-SW. Um conjunto de estruturas E-W, ligadas à abertura do Atlântico, também ocorre de forma subordinada. Os estilos estruturais se misturam em locais onde intrusões ígneas intrudem zonas de falha, e soerguimentos em domo podem ocorrer nas intersecções entre zonas de falha NW-SE e SW-NE. Essas grandes estruturas (Figura 8) correspondem a zonas de fraqueza do embasamento, tendo atuado no controle da evolução da bacia.

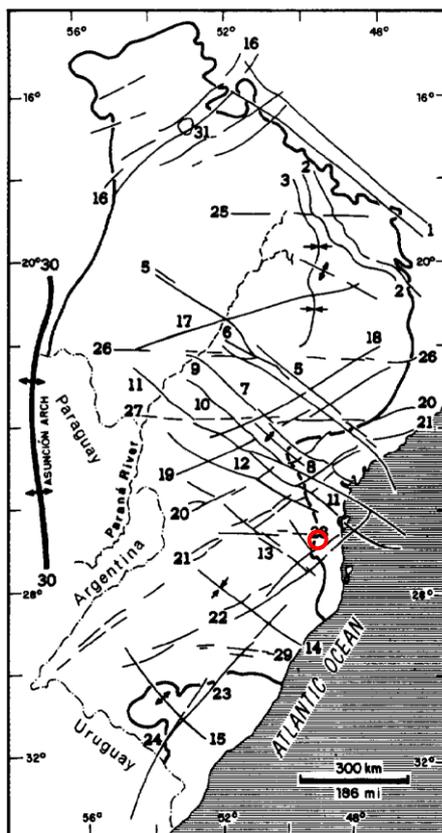


Figura 8 – Arcabouço estrutural regional da Bacia do Paraná, com destaque em vermelho para a localização aproximada da área de estudo. 1: Arco do Alto Parnaíba; 2: Flexura de Goiânia; 3: Eixo do depocentro de Ipiaçu-Campina Verde; 4: Alto de Cardoso; 5: Zona de falha de Guapiara; 6: Falha de Santo Anastácio; 7: Falha de São Jerônimo-Curiúva; 8: Arco de Ponta Grossa; 9: Zona de falha de Curitiba-Maringá; 10: Falha do Rio Alonzo; 11: Zona de falha de Candido de Abreu-Campo Mourão; 12: Lineamento Rio Piquiri; 13: Zona de falha de Caçador; 14: Sinclinal de Torres; 15: Arco do Rio Grande; 16: Zona de falha Transbrasiliiano; 17: Lineamento de Araçatuba; 18: Falha de Guaxupé; 19: Falha de Jacutinga; 20: Zona de falha de Taxaquara; 21: Zona de falha Lancinha-Cubatão; 22: Zona de falha Blumenau-Soledade; 23: Falha de Leão; 24: Açotea; 25: Lineamento Cassilândia; 26: Lineamento Moji-Guaçu/Dourados; 27: Lineamento São Sebastião; 28: Lineamento de Taquara Verde; 29: Lineamento bento Gonçalves; 30: Arco de Asunción; 31: Domo de Araguainha. Fonte: Zalán *et al.* (1980).

2.2.5. Geologia da Região de Ascurra

A área de estudo está localizada na região limítrofe entre a Província Mantiqueira e as coberturas fanerozoicas da Plataforma Sul-Americana que a recobrem a oeste, englobando o contato entre as unidades do Complexo Granulítico de Santa Catarina (CGSC), Bacia do Itajaí e Bacia do Paraná (Supersequência Gondwana I).

As litologias do Complexo Granulítico de Santa Catarina contidas na área são gnaisses tonalíticos a granodioríticos, foliados a bandados, pertencentes à unidade Ortognaisse Pomerode (CPRM, 2014).

Conforme o mapa geológico da CPRM (2014) (Figura 9), a Bacia do Itajaí, na área de estudo, é representada pelas formações Gaspar, Garcia e Apiúna. A Formação Gaspar compreende arenitos arcoseanos finos a médios, mal selecionados, com estratificação cruzada acanalada de baixo ângulo e pequeno porte, e conglomerados polimíticos de matriz arcoseana, com tufos vulcânicos associados e siltitos subordinados. A Formação Garcia, por sua vez, compreende quatro litofácies distintas: Litofácies conglomerado, composta por conglomerados polimíticos, clasto sustentados, com matriz mal selecionada; Litofácies ritmito, composta por intercalações de lamitos, siltitos e arenitos finos a médios, com estratificação plano-paralela ou maciços, dispostos em camadas tabulares com granodecrescência ascendente; Litofácies arenito e conglomerado, composta por arenitos avermelhados, mal selecionados, com estratificação cruzada acanalada e cruzada cavalgante, contendo intercalações de níveis conglomeráticos e lâminas de siltitos maciços; e Litofácies silito e argilito, composta por siltitos intercalados com argilitos avermelhados, maciços ou com laminações plano-paralelas e estruturas *wavy* e *linsen*. A Formação Apiúna, por fim, é composta por rochas riolíticas rosa avermelhadas, microporfiríticas a porfiríticas, contendo fenocristais de feldspato potássico e quartzo.

A Bacia do Paraná, em grande parte, é representada na área de estudo pelas Formações Taciba e Rio Bonito, pertencentes à Supersequência Gondwana I. A Formação Taciba consiste em conglomerados polimíticos, arenitos finos a grossos e alternâncias de folhelhos e siltitos com clastos pingados, interpretados como sendo da interface continente-plataforma com influência glacial. Conforme Zielinski (2014), a Fm. Taciba é subdividida em três unidades, da base para o topo: Membro Rio Segredo, constituído por arenitos; Membro Chapéu do Sol, formado por diamictitos; e Membro Rio do Sul, composto por ritmitos, siltitos e folhelhos.

A Formação Rio Bonito, composta por arenitos, siltitos, folhelhos, carvão, diamictitos e margas de ambiente flúvio-deltaico, litorâneo e plataformal, também ocorre pontualmente no limite sudoeste da área (CPRM, 2014). Assim como a Formação Taciba, ela divide-se em três membros distintos: Membro Triunfo, caracterizado por arenitos e conglomerados com estratificações paralelas, cruzadas planares e cruzadas acanaladas, com ocorrências localizadas de folhelhos, argilitos, siltitos e carvão; Membro Paraguaçu, constituído por sedimentação pelítica e arenitos finos com laminação (plano-paralela e ondulada) e bioturbação; e Membro Siderópolis, composto por arenitos com intercalações de siltitos, folhelhos carbonosos e carvão (ZIELINSKI, 2014).

Por fim, as regiões planas e entornos dos rios na área são recobertos por Depósitos aluvionares, compostos por sedimentos cenozoicos (CPRM, 2014).

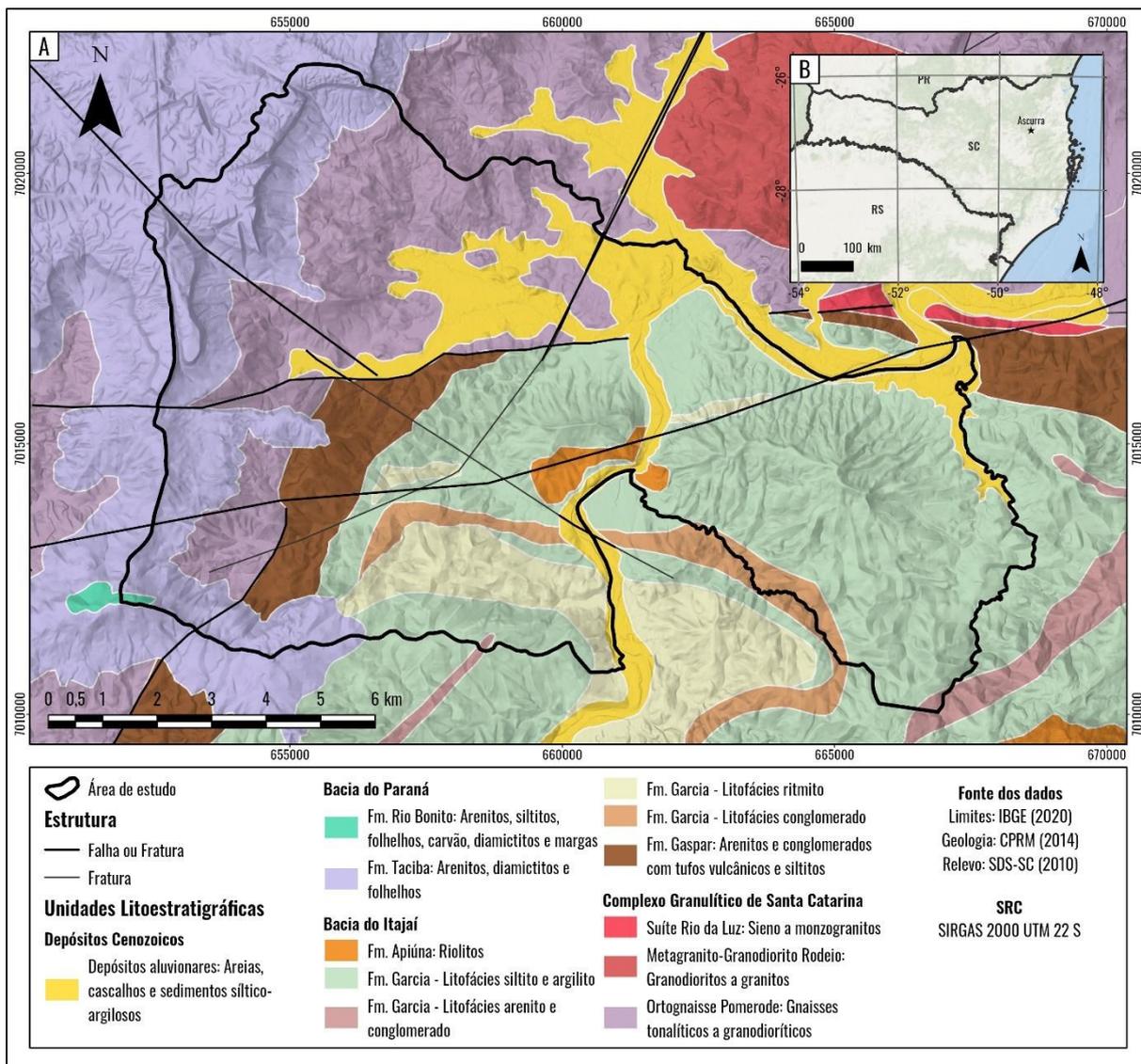


Figura 9 – Mapa geológico da área de estudo. A) Geologia da região de Ascurra. B) Localização do município no estado. Fonte: Adaptado de CPRM (2014).

2.3. CLIMA

O clima na região de Ascurra, conforme a classificação de Köppen, é caracterizado como mesotérmico úmido, sem estação definida, com verões quentes, temperatura média anual de 19,7° C e precipitação total anual entre 1770 e 1799 mm (ASCURRA, 2014). Não há estação seca na região do Vale do Itajaí, e a maior concentração de precipitação ocorre nos meses de janeiro e fevereiro, sendo os meses de maio a julho os de menor precipitação (FRAGA, 2003).

A presença da escarpa da Serra Geral também age como uma barreira para a umidade vinda do Oceano Atlântico, causando intensa pluviosidade nas encostas montanhosas da região (CEPED UFSC, 2013).

2.4. HIDROGRAFIA

O município de Ascurra está inserido na Bacia Hidrográfica do Itajaí (Figura 10), mais especificamente na sub-bacia do Rio Itajaí-Açu, que representa o principal curso d'água da bacia e atravessa o município de sul a norte, também definindo parte de seus limites municipais. O Rio Itajaí-Açu possui cerca de 188 km de comprimento e sua sub-bacia abrange uma área de aproximadamente 2780 km². Ele é formado pela junção dos rios Itajaí do Oeste e Itajaí do Sul, no município de Rio do Sul, e seus principais afluentes são os rios Itajaí do Norte, Benedito, Luís Alves e Itajaí Mirim (FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ, 2010).

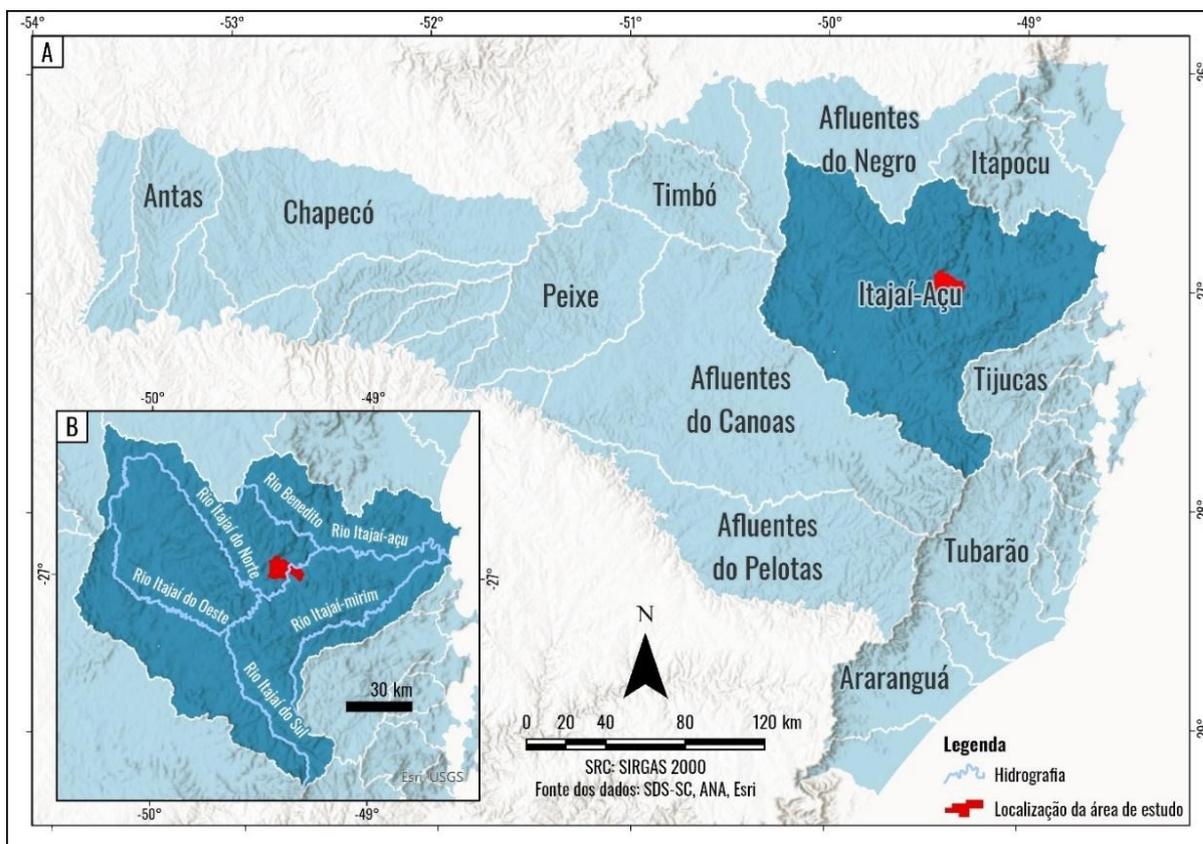


Figura 10 – Bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu. A) Divisão das principais bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina, com destaque para a Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu. B) Detalhe da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, com os principais rios que a compõem. Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados de bacias hidrográficas da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Social (SDS-SC) e de hidrografia da Agência Nacional das Águas (ANA).

O traçado do Rio Itajaí-Açu é sinuoso, com curvas abruptas, largura entre 100 e 200 metros e vazão média de 140 m³/s, que pode chegar a 15 m³/s em épocas de estiagem e 5.000 m³/s em grandes enchentes (POFFO, 2001).

Os rios formadores do Itajaí-Açu vêm de regiões mais elevadas, na Serra Geral, o que resulta em uma grande velocidade de deflúvio. As cabeceiras dos rios Itajaí do Oeste e Itajaí do Sul localizam-se a cotas de 900-1000 m, e percorrem um trecho de declividade acentuada (5,21 m/km) a partir da junção dos dois rios em Rio do Sul até a foz do Rio Itajaí do Norte, ponto a partir do qual percorrem declividades medianas (1,6 m/km) até Blumenau, e declividades muito baixas dali em diante (TASCA, 2012).

No município de Ascurra, os principais afluentes do Rio Itajaí-Açu são o Ribeirão Santa Bárbara, o Ribeirão Ilse, o Ribeirão São Paulo, o Ribeirão Guaricana e o Arroio Fistorall (Figura 11).

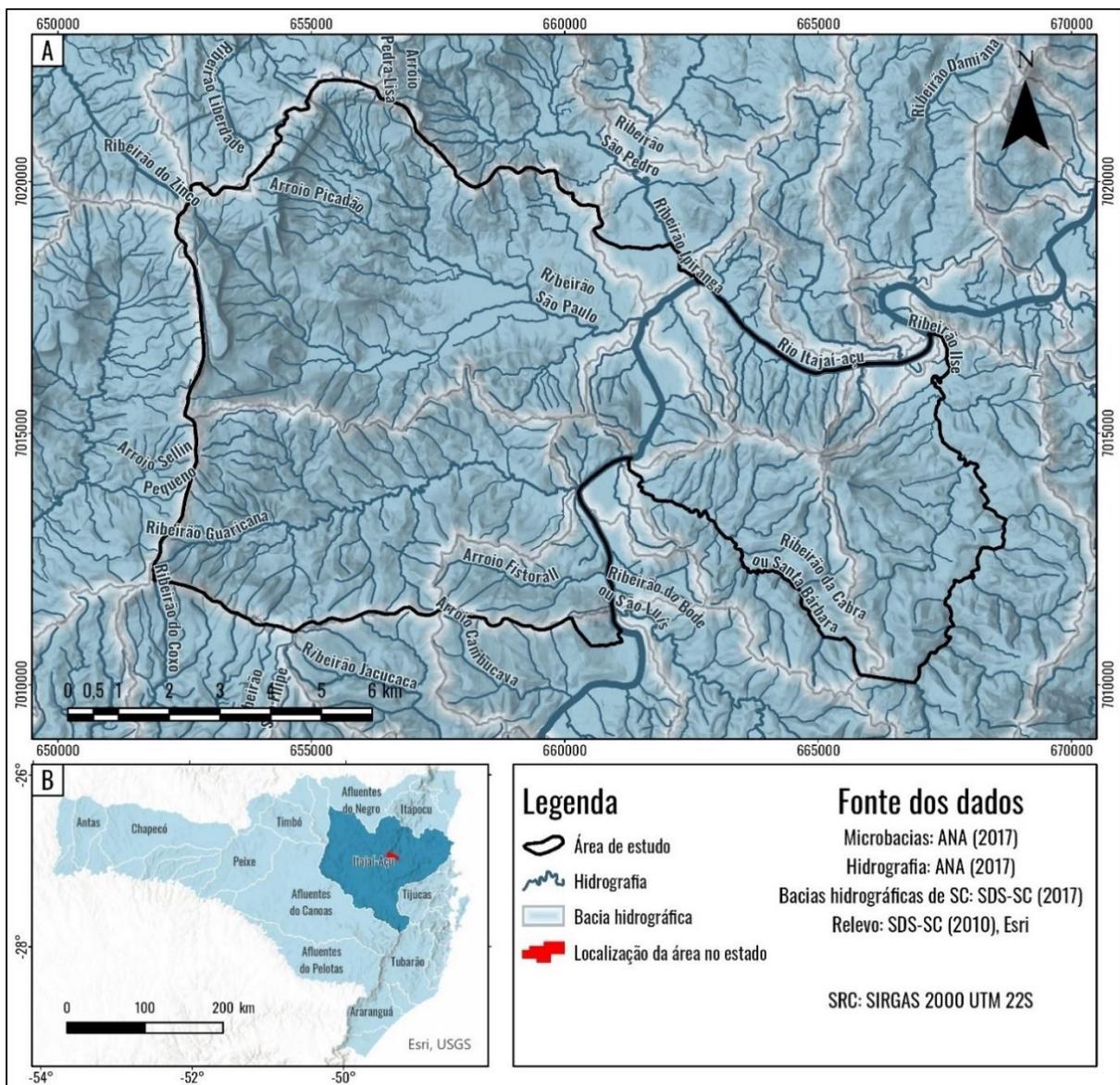


Figura 11 – Hidrografia da área de estudo. A) Drenagem e divisão das microbacias na região de Ascurra. B) Localização do município no estado, com a divisão das principais bacias hidrográficas e destaque para a Bacia Hidrográfica do Itajaí.

2.5. GEOMORFOLOGIA

A área de estudo está colocada principalmente sobre a unidade geomorfológica das Serras do Leste Catarinense. Essa unidade é constituída por agrupamentos de cristas paralelas e subparalelas orientadas preferencialmente na direção NE (orientadas segundo a estrutura do embasamento) e separadas por vales profundos. Em Ascurra, as maiores cotas altimétricas dessa unidade ocorrem na faixa dos 500-600 metros. Os vales na área de estudo, por sua vez, são preenchidos por planícies e terraços sedimentares, compreendendo a unidade das Planícies Colúvio-Aluvionares. No limite oeste da área, ocorre também a unidade geomorfológica dos Patamares do Alto Rio Itajaí. Nessa unidade, a existência de rochas sedimentares mais resistentes, como arenitos, e de rochas menos resistentes, como folhelhos, propicia a formação de patamares e relevos residuais de topo plano limitados por escarpas, com grandes variações altimétricas. A drenagem nessa unidade também se mostra adaptada a alinhamentos estruturais, principalmente no alto curso dos rios – sendo o vale do Rio Itajaí do Norte o exemplo mais marcante –, e é responsável pela intensa dissecação do relevo da unidade (ROSA, 2002).

2.6. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A colonização de Ascurra, inicialmente parte da Colônia de Blumenau, começou em 1874, com a demarcação de lotes, ruas e infraestrutura urbana, e os primeiros imigrantes italianos chegaram em 1876, dando início à ocupação da área. No ano de 1934, ocorreu a emancipação do Distrito de Indaial – incluindo a área de Ascurra – e seu desmembramento do município de Blumenau. A emancipação do Distrito de Ascurra, por sua vez, ocorreu no ano de 1963 (ASCURRA, 2014).

As áreas de vegetação em Ascurra compreendem o bioma nativo da Mata Atlântica, presente principalmente nos morros e serras que permeiam o município, assim como zonas de reflorestamento, que incluem principalmente o cultivo de eucaliptos, com presença menos expressiva de pinus. Em 2001, esses reflorestamentos ocupavam cerca de 7,8% da área do município. Quanto à vegetação nativa de Mata Atlântica, as espécies arbóreas mais comuns são a canela, o palmitero e o cedro (POFFO, 2001).

As áreas mais baixas do município de Ascurra têm características hidrológicas favoráveis ao cultivo do arroz, com uma vasta rede de drenagem, que também favorece a ocorrência de enchentes periódicas. O cultivo do arroz irrigado em regime de economia familiar representa grande parte da atividade econômica do município, correspondendo a 66% da atividade agrícola, com produtividade média de 7.000 Kg/ha. Outras atividades rurais, como

cultivo de milho, banana, fumo, mandioca, batata-doce, oleicultura, fruticultura, apicultura, avicultura, suinocultura, piscicultura, vinicultura e reflorestamento também estão presentes em menor escala. Há 303 propriedades rurais no município, que abrigam cerca de 204 famílias (representando 22,4% da população de Ascurra) e são divididas em 8 comunidades: Ribeirão São Paulo, Saxônia, Vila Nova, Ilze Grande, Ilze Estrada Geral, Ribeirão Santa Bárbara, Guaricanas I e Guaricanas II (POFFO, 2001; ASCURRA, 2014).

3. REVISÃO CONCEITUAL

3.1. DESLIZAMENTOS OU MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

O termo “deslizamento” – *landslide* – é muitas vezes usado na linguagem popular, de forma abrangente, para descrever uma vasta gama de processos de movimento de massa que ocorrem em encostas, mesmo quando o movimento em questão não envolve estritamente o deslizamento sobre uma superfície (VARNES, 1978). Um movimento de massa – ou movimento gravitacional de massa –, por sua vez, pode ser definido como qualquer deslocamento de solo, rochas e/ou vegetação ao longo de uma vertente sob ação da gravidade (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015). Esses processos ocorrem de forma natural, e são importantes na evolução geomorfológica das vertentes em regiões serranas e montanhosas, mas podem ocorrer em função da ocupação e antropização desordenada de encostas, sem que sejam tomadas as devidas medidas de estabilização (TOMINAGA, 2007), causando danos e perdas às populações locais atingidas.

Movimentos gravitacionais de massa são resultado da instabilidade de uma encosta, e ocorrem quando as forças gravitacionais – agindo na forma de tensão de cisalhamento – superam as forças que mantêm o material formador da encosta estável (resistência ao cisalhamento) (PANEK, 2020).

Segundo Wieczorek (1996), um deslizamento pode ser resultado da interação entre vários fatores – sejam eles de origem geológica, morfológica, física ou humana – e é geralmente desencadeado por um único “gatilho”, ou agente deflagrador. Esse gatilho é um estímulo externo, como um período de chuvas intensas, um terremoto ou uma erupção vulcânica (Tabela 1), que causa rápido aumento do stress em uma encosta, ou ainda que diminui a resistência dos materiais que a compõem, desencadeando o falhamento. Nem sempre um deslizamento possui um gatilho aparente, pois alguns processos – como o intemperismo químico e físico – podem gradualmente diminuir a estabilidade de uma encosta até o ponto de ruptura.

Tabela 1 – Exemplos de gatilhos de deslizamentos e processos naturais e antrópicos envolvidos.

Gatilhos	Processos naturais	Processos antrópicos
Sobrecarga da encosta	Precipitação, sobrecarga de árvores, cinzas vulcânicas, outros deslizamentos	Colocação de materiais de construção, aterros e depósitos de resíduos
Aumento da altura ou declividade da encosta	Incisão ou corte do sopé por processos fluviais ou glaciais, inclinação e/ou elevação induzida por tectônica ou vulcanismo	Escavação ou construção de taludes

<i>Debuttressing</i>	Recuo de geleiras, remoção de carga d'água	Retirada de material sobre a base da encosta
Redução de resistência inerente	Intemperismo, processos em juntas, apodrecimento de raízes, escavações de animais, degradação da camada de <i>permafrost</i> , etc.	Construção de túneis, mineração subterrânea, desmatamento, efeitos da chuva ácida
Aumento a longo prazo do nível d'água subterrâneo	Mudanças climáticas, preenchimento de lagos naturais, transgressões marinhas	Infiltração por tubulações quebradas, irrigação, remoção de vegetação
Rápido aumento de poro-pressão	Chuvas intensas, rápido degelo, sobrecarga não-drenada por colocação rápida de sedimentos (ex: devido a outro deslizamento)	Sobrecarga sem drenagem devido à colocação de uma carga pesada
Rebaixamento do nível d'água subterrâneo	Quebra de barragens naturais	Diminuição do nível d'água de um reservatório
Vibrações	Terremotos, ventos, deslizamentos próximos	Vibrações de máquinas
Remoção de vegetação	Incêndios naturais	Desmatamento

Fonte: Panek (2020).

No Brasil, desastres relacionados a movimentos de massa estão associados geralmente a eventos de precipitação intensa e prolongada, especialmente nos períodos que correspondem ao verão (TOMINAGA, SANTORO E AMARAL, 2015), mas diversos autores chamam atenção para o aumento do número de registros de desastres naturais nas últimas décadas, que acompanha o crescimento populacional e consequente ocupação de áreas suscetíveis à ocorrência desses fenômenos.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Hungr, Leroueil e Picarelli (2014), a primeira distinção entre os tipos básicos de movimentos de massa (quedas, escorregamentos e fluxos) foi feita por Baltzer (1875), sendo que estes tipos perduram até hoje com algumas adições. Desde então, muitos sistemas para a classificação desses fenômenos foram propostos, como os de Sharpe (1938), Varnes (1954), Freire (1965) e Augusto Filho (1992). Apesar disso, a classificação mais amplamente utilizada internacionalmente, com algumas variações regionais, é aquela proposta por Varnes (1978). Este autor utilizou o tipo de movimento e de material deslocado como principais atributos para a classificação de movimentos gravitacionais de massa, propondo denominações usando esses dois descritores. Os tipos de movimento reconhecidos pelo autor são (a) quedas, (b) tombamentos, (c) escorregamentos, (d) espalhamentos laterais e (e) fluxos – sendo também reconhecido um grupo complexo para combinações entre dois ou mais tipos – e os materiais usados para a classificação são (a) rocha, (b) detritos e (c) terra (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação simplificada de movimentos gravitacionais de massa conforme Varnes (1978).

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solos de engenharia	
				Predomin. grosso	Predomin. fino
Queda			Queda de rochas	Queda de detritos	Queda de terra
Tombamento			Tombamento de rochas	Tombamento de detritos	Tombamento de terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Escorregamento rotacional de rochas	Escorregamento rotacional de detritos	Escorregamento rotacional de terra
	Translacional		Escorregamento translacional de bloco de rochas	Escorregamento translacional de bloco de detritos	Escorregamento translacional de bloco de terra
			Muitas unidades	Escorregamento translacional de rochas	Escorregamento translacional de detritos
Espalhamento lateral			Espalhamento de rochas	Espalhamento de detritos	Espalhamento de terra
Fluxo			Fluxo de rochas	Fluxo de detritos	Fluxo de terra
Complexo			Combinação de dois ou mais tipos de movimento		

Fonte: Varnes (1978).

Hungr, Leroueil e Picarelli (2014) propuseram uma atualização no sistema de classificação de Varnes (1978), com o objetivo de substituir a terminologia utilizada para identificação dos tipos de materiais, que carecia de compatibilidade tanto com a terminologia geológica quanto geotécnica de rochas e solos, e implementar mudanças menores com base nos avanços recentes da ciência para o tema, enquanto ainda mantendo um bom grau de flexibilidade para diferentes focos de estudo. Essa atualização resultou na substituição dos termos anteriormente utilizados – rocha, detritos e terra – por uma seleção mais compreensiva, com cunho geotécnico, de termos descritivos de materiais – (a) rochas, (b) argila, (c) lama, (d) silte, (e) areia, (f) cascalho, (g) matacões, (h) detritos, (i) turfa e (j) gelo – além da possibilidade de inclusão de características suplementares à nomenclatura da classificação (Tabela 3).

Tabela 3 – Classificação de Hungr, Leroueil e Picarelli (2014) para movimentos gravitacionais de massa. As nomenclaturas de materiais expostas em itálico são exclusivas (apenas uma delas deve ser utilizada para a classificação). Classificações expostas em negrito são aquelas que geralmente atingem altas velocidades.

Tipo de movimento	Em Rochas	Em Solo
Queda	1. Queda de rochas/gelo	2. Queda de matacões/detritos/silte
Tombamento	3. Tombamento de bloco de rochas	5. Tombamento de cascalho/areia/silte
	4. Tombamento flexural de rochas	
Escorregamento	6. Escorregamento rotacional de rochas	11. Escorregamento rotacional de <i>argila/silte</i>
	7. Escorregamento planar de rochas	12. Escorregamento planar de <i>argila/silte</i>

	8. Escorregamento em cunha de rochas	13. Escorregamento de cascalho/areia/detritos
	9. Escorregamento composto de rochas	14. Escorregamento composto de <i>argila/silte</i>
	10. Escorregamento irregular de rochas	
Espalhamento	15. Espalhamento de encosta rochosa	16. Espalhamento de liquefação de areia/silte
		17. Espalhamento de argila sensível
Fluxo	18. Avalanche de rochas/gelo	19. Fluxo seco de <i>areia/silte/detritos</i>
		20. Fluxo de escorregamento de areia/silte/detritos
		21. Fluxo de escorregamento de argila sensível
		22. Fluxo de detritos
		23. Fluxo de lama
		24. Inundação de detritos
		25. Avalanche de detritos
		26. Fluxo de terra
27. Fluxo de turfa		
Deformação de encosta	28. Deformação de encosta montanhosa	30. Deformação de solo de encosta
	29. Deformação de encosta rochosa	31. Rastejo de solo
		32. Solifluxão

Fonte: Hungr, Leroueil e Picarelli (2014).

No Brasil, o esquema de classificação de movimentos de massa segue as propostas de autores como Augusto Filho (1994) e Kobiyama *et al.* (2006), que, com algumas variações, adotam quatro tipos básicos de movimentos, descritos a seguir.

3.2.1. Escorregamentos

Segundo Tominaga, Santoro e Amaral (2015, p. 28), “escorregamentos são movimentos rápidos de porções de terrenos (solos e rochas) com volumes definidos, deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou da vertente.” Eles ocorrem quando a força gravitacional exercida em uma encosta excede o atrito das partículas, que é responsável pela estabilidade, causando o falhamento. A infiltração de água no maciço é geralmente a responsável pela diminuição gradual do atrito entre as partículas, e o movimento não envolve inicialmente todo o volume de material na superfície de ruptura, mas aumenta a partir de uma zona de falha local. A velocidade do movimento varia de quase zero a alguns metros por segundo, em função da inclinação da superfície de escorregamento, da causa inicial do movimento e da natureza do terreno. Essa velocidade é geralmente maior em terrenos mais

homogêneos, que possuem coesão e atrito interno elevados (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008; TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015).

Em muitos casos, os termos “escorregamento” e “deslizamento” são utilizados como sinônimos, correspondendo à palavra *slide* da língua inglesa. Neste trabalho, o termo “deslizamento” (*landslide*) será utilizado exclusivamente como uma forma geral de se referir a movimentos rápidos de massa, incluindo outras classificações, enquanto o termo “escorregamento” (*slide*) será usado para referir-se a este tipo específico de movimento.

Os escorregamentos podem ser divididos em translacionais, rotacionais e em cunha, conforme sua geometria e natureza dos materiais envolvidos no movimento.

Em um escorregamento translacional (Figura 12), a massa instabilizada se move para baixo e para fora da encosta ao longo de uma superfície relativamente planar, sem movimento de rotação, podendo envolver desde solos inconsolidados até blocos extensos de rochas. A superfície de ruptura geralmente corresponde a uma descontinuidade na estrutura do maciço, como uma falha, junta, superfície de acamadamento ou contato entre rocha e solo. Esse tipo de movimento é geralmente raso e sua velocidade varia de inicialmente lenta para moderada, mas pode progredir por distâncias consideráveis quando a superfície de ruptura é suficientemente inclinada, atingindo grandes velocidades e podendo evoluir para uma corrida de massa (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

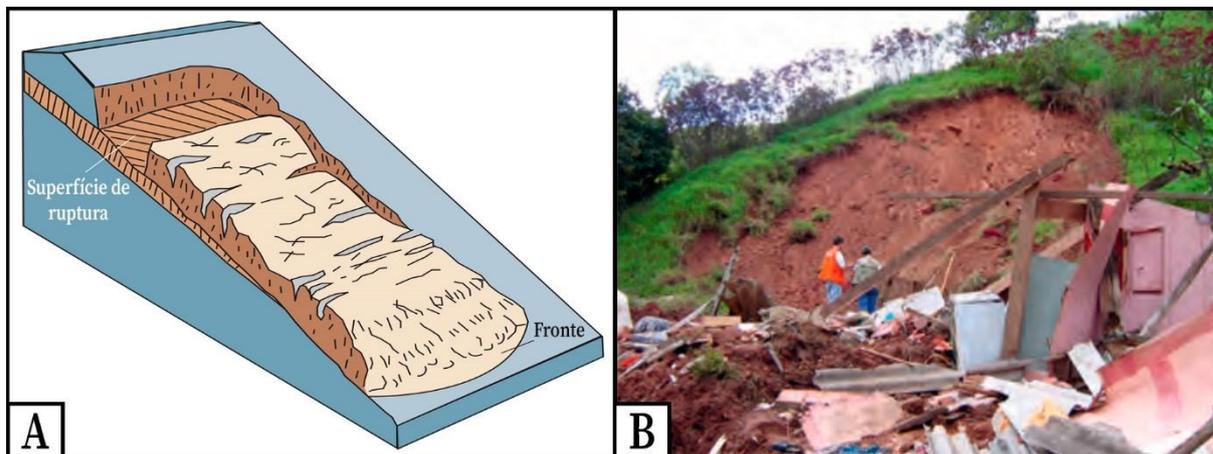


Figura 12 – Deslizamentos translacionais. A) Esquema ilustrativo de um escorregamento translacional. Adaptado de Highland e Bobrowski (2008). B) Escorregamento translacional ocorrido em Campo Limpo Paulista em 2009. Fonte: Tominaga, Santoro e Amaral (2015).

Os escorregamentos rotacionais (Figura 13), por outro lado, são caracterizados por uma superfície de ruptura curva, em formato de colher, ao longo da qual ocorre o movimento rotacional da massa instabilizada. Esse tipo de movimento geralmente ocorre em solos espessos

e homogêneos, e muitas vezes é provocado pela execução de cortes ou erosão fluvial no sopé da encosta (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015). Segundo Highland e Bobrowski (2008), esse tipo de movimento de massa pode ter velocidades extremamente lentas a moderadamente rápidas, e pode ser muito danoso a estruturas.

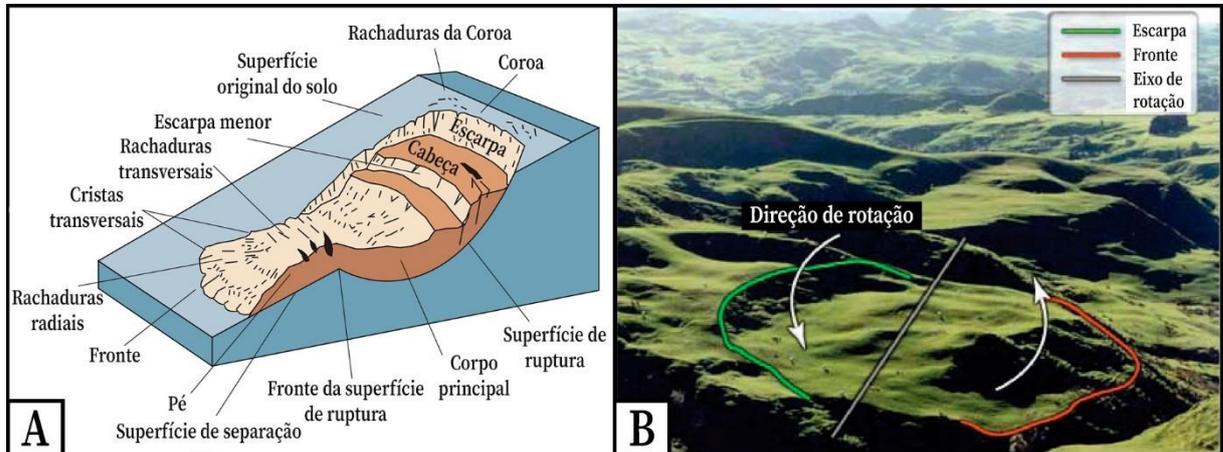


Figura 13 – Deslizamentos rotacionais. A) Esquema ilustrativo de um escorregamento rotacional. B) Escorregamento rotacional ocorrido na Nova Zelândia, com indicação do movimento rotativo vertical desenvolvido. Adaptado de Highland e Bobrowski (2008).

Os escorregamentos em cunha (Figura 14) ocorrem a partir da interação de múltiplos planos de descontinuidade desfavoráveis à estabilidade em um maciço, causando deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção desses planos. Eles são restritos a locais com relevo fortemente controlado por estruturas geológicas, e ocorrem principalmente em taludes de corte ou encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015).

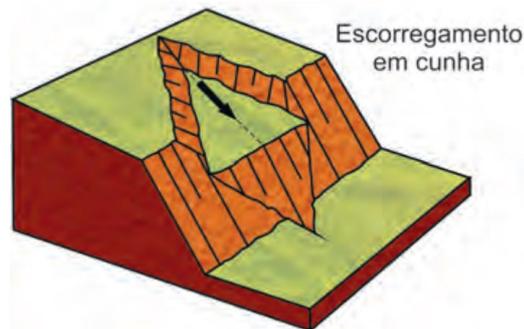


Figura 14 – Ilustração esquemática de um escorregamento em cunha. Fonte: Tominaga, Santoro e Amaral (2015).

3.2.2. Corridas

As corridas (Figura 15) são movimentos de massa causados pela perda do atrito interno das partículas em um solo, em função da presença de grandes quantidades de água. Esse tipo

de movimento pode evoluir a partir de um escorregamento, quando o material deslocado entra em contato com a drenagem, formando uma massa de alta densidade e viscosidade. Corridas podem atingir altíssimas velocidades de deslocamento e cobrir grandes distâncias, mesmo em áreas de baixa declividade, sendo muito mais destrutivas que os escorregamentos (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

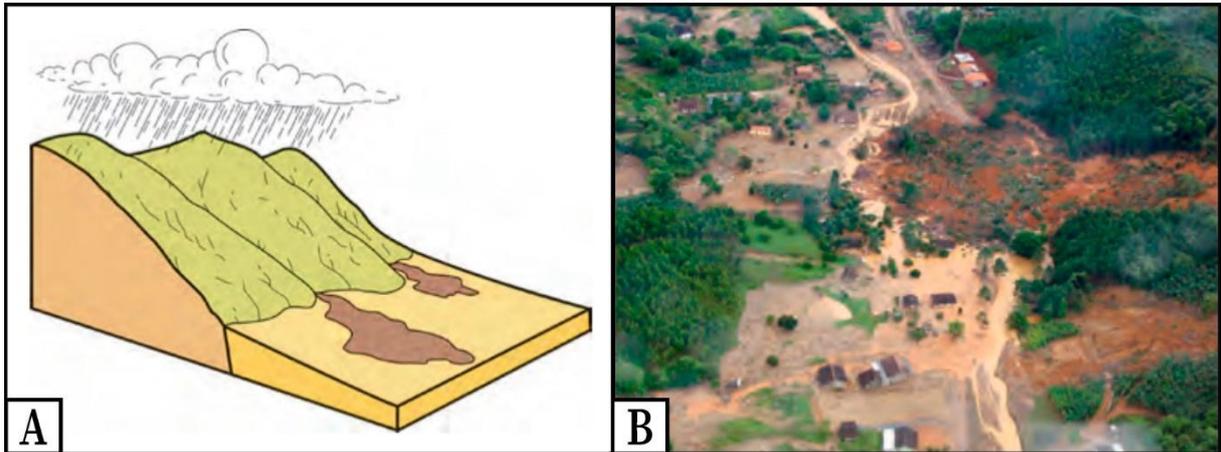


Figura 15 – Corridas de massa. A) Ilustração esquemática de uma corrida de massa. B) Corrida detrítica ocorrida no Morro do Baú, em SC, no ano de 2008. Adaptado de Tominaga, Santoro e Amaral (2015).

3.2.3. Quedas

As quedas (Figura 16) ocorrem quando um bloco de rocha ou solo se desprende de uma encosta íngreme, sem a presença de planos de deslocamento, e se movimenta vertente abaixo por queda, saltação e/ou rolamento. O desprendimento do bloco pode ser causado por variação térmica do maciço, perda de sustentação dos blocos por erosão da água, vibrações, dentre outros fatores (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

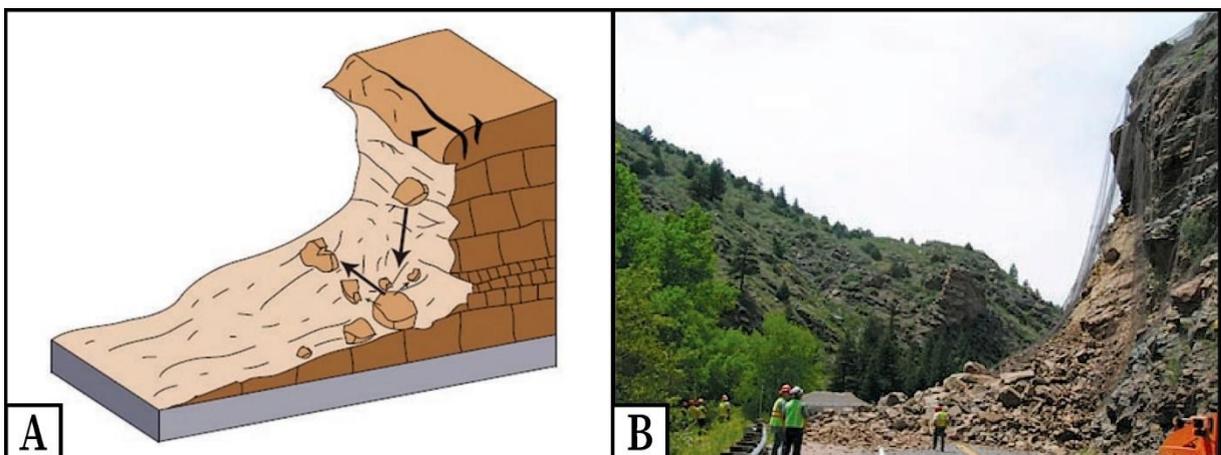


Figura 16 – Quedas de blocos. A) Ilustração esquemática de uma queda de blocos. B) Queda de blocos ocorrida nos Estados Unidos em 2005. Adaptado de Highland e Bobrowski (2008).

3.2.4. Rastejos

Os rastejos (Figura 17) são movimentos extremamente lentos e contínuos de solos e rochas encosta abaixo, sem limites definidos, causados por stress interno suficiente para causar deformação, mas não o suficiente para causar ruptura. Também estão associados ao processo de expansão e contração em função das variações térmicas e de umidade do solo, podendo ocorrer de forma sazonal. Rastejos podem lentamente causar danos e deslocamentos em estruturas, e também podem preceder outros tipos mais perigosos de movimentos de massa (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2015; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

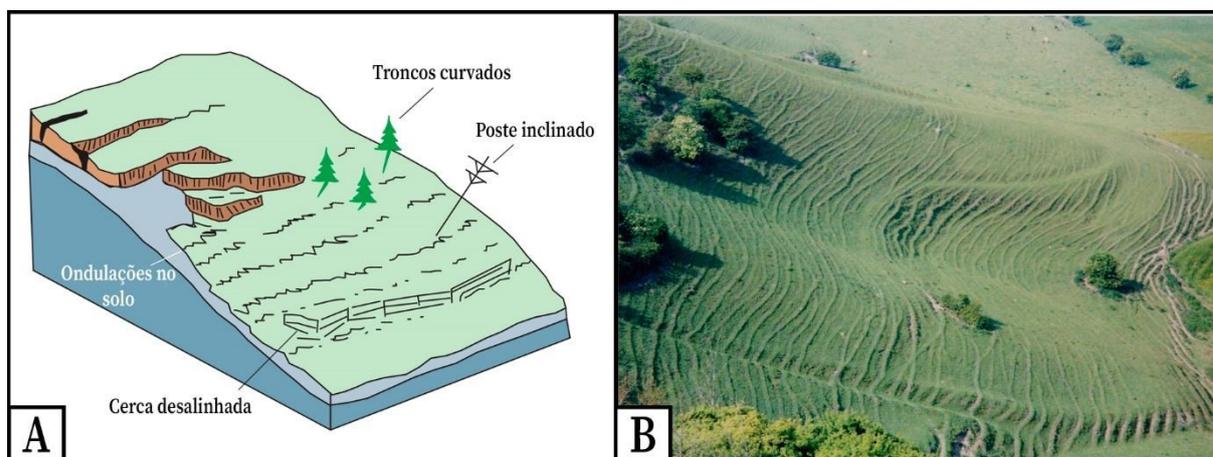


Figura 17 – Rastejos. A) Ilustração esquemática de um rastejo, mostrando também indicações da presença desse tipo de movimento em estruturas e na vegetação. B) Ocorrência de rastejos no Reino Unido. Adaptado de Highland e Bobrowski (2008).

3.3. FATORES CONDICIONANTES DE MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo Guidicini e Nieble (1984), os fatores que influenciam na instabilidade de uma encosta podem ser divididos em agentes predisponentes e agentes efetivos. Os agentes predisponentes correspondem a características intrínsecas do terreno, podendo ser de origem geológica, geomorfológica, climato-hidrológica ou conforme a gravidade, calor solar e tipo de vegetação original da área. Os agentes efetivos, por outro lado, correspondem aos gatilhos propostos por Wieczorek (1996), e consistem em fatores responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa, podendo ser preparatórios (pluviosidade, erosão, variação térmica, ação antrópica, etc.) ou imediatos (chuvas intensas e/ou prolongadas, terremotos, etc.).

Determinadas áreas são naturalmente mais suscetíveis à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, devido à presença e interação de determinados agentes predisponentes, atuando sobre as encostas na forma de causas, que podem ser (a) internas (levam à ruptura da encosta através da diminuição da resistência interna do material sem modificação em sua

geometria), externas (levam à ruptura por aumento das tensões de cisalhamento sem diminuição da resistência interna) e intermediárias (resultam de efeitos causados por agentes externos no interior da encosta) (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

3.3.1. Condicionantes Geológicas

Entre os agentes predisponentes de origem geológica, destacam-se aqueles relacionados à estrutura e litologia das rochas presentes em uma encosta. Bigarella e Passos (2003) apud Pinto, Passos e Caneparo (2013), a respeito da estrutura do maciço, afirmam que os padrões de planos de descontinuidade, como fraturas, falhas e bandamentos, desempenham um importante papel na infiltração e circulação de água no maciço, influenciando, dessa forma, no processo de intemperismo das rochas. Em solos residuais, ou saprólitos, também se observa a presença de planos de descontinuidade herdados da estrutura da rocha ou de horizontes de solo formados por processos pedogenéticos, que propiciam a ocorrência de movimentos de massa, especialmente quando tais planos mergulham para fora da vertente (TOMINAGA, 2007).

Varnes (1978) sugere também que o grau de arredondamento dos grãos em um maciço é um fator que influencia na resistência ao cisalhamento, visto que a compressibilidade e fricção interna do material aumentam com a angularidade dos grãos. Materiais compostos de argilas ou de minerais micáceos, assim como materiais que podem ser alterados para argilas, também apresentam, em geral, uma baixa resistência ao desenvolvimento de movimentos de massa.

Segundo Abransom *et al.* (2002), rochas ígneas – como granitos e gabros – apresentam altíssima resistência quando não estão afetadas intensamente pelo intemperismo. A presença de planos de descontinuidade, no entanto, facilita a ação do intemperismo, gerando zonas de alteração, ao longo das quais tendem a ocorrer deslizamentos. Essa tendência é acentuada quando ocorre a alteração da rocha para argilas de caráter expansivo, que sofrem variações de volume com a adição e remoção de água.

3.3.2. Condicionantes Geomorfológicos

Os aspectos geomorfológicos amplamente considerados como agentes predisponentes de movimentos de massa são a declividade, forma, orientação, amplitude e altitude da vertente, assim como a espessura do solo e presença de depósitos de vertentes (colúvios). Vertentes íngremes, altas, com grande concentração de água no solo, com cobertura de solo profundamente intemperizado, com base descalçada e apresentando material de baixa coesão posicionado abaixo de material mais resistente, estão mais propensas à instabilidade. Essa

propensão à ocorrência de deslizamentos é acentuada em áreas sujeitas a chuvas torrenciais e terremotos (TOMINAGA, 2007).

3.3.3. Ação antrópica

Segundo Pinto, Passos e Canegaro (2013), a ação antrópica no uso e ocupação do território influencia na dinâmica natural de evolução das vertentes. Atividades como desmatamentos, recortes nos terrenos, aterros para construção e retificação de canais fluviais modificam o equilíbrio das encostas, muitas vezes induzindo a ocorrência de movimentos de massa.

Em muitas áreas urbanas, a população convive com a frequente incidência de deslizamentos, induzidos por atividades como remoção da cobertura vegetal, lançamento e concentração de águas servidas, vazamento em redes de abastecimento, presença de esgoto e fossas, cortes em taludes com altura e inclinação inadequadas, lançamento de lixo nas encostas, etc. (TOMINAGA, 2007).

3.3.4. Cobertura vegetal

A ausência de cobertura vegetal, muitas vezes em função da ação antrópica, pode ser considerada um agente efetivo preparatório à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, uma vez que as florestas atuam na atenuação da ação dos agentes climáticos sobre as encostas. De forma geral, as copas das árvores interceptam raios solares, ventos e chuva, evitando variações bruscas de umidade e temperatura e diminuindo a quantidade de água infiltrada nos maciços, enquanto as raízes estruturam o solo, reduzem a intensidade de infiltração efetiva e retiram parte da umidade presente nele. Os detritos vegetais acumulados sobre o solo das florestas também ajudam nesse sentido, evitando o contato direto da água com o solo e freando, em partes, o escoamento superficial (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

3.3.5. Pluviosidade

A pluviosidade é um importante fator a ser considerado para a suscetibilidade das encostas de uma região a movimentos de massa, podendo agir tanto como agente predisponente quanto como gatilho para a deflagração desses fenômenos. Segundo Pinto, Passos e Canegaro (2013, p. 111):

“Índices pluviométricos elevados provocam a saturação do solo ou rocha, reduzindo a resistência à desagregação, refletindo em perda de estabilidade das encostas. Portanto, alta pluviosidade, em vertentes íngremes, representa um dos principais fatores desencadeantes dos processos [de movimentos de massa].”

No Brasil, os eventos pluviométricos extremos, nos quais grandes volumes de chuva são registrados em curtos intervalos de tempo, são os principais gatilhos para a deflagração de deslizamentos. Essa relação é exemplificada pela maior ocorrência desses fenômenos nos meses de novembro a março, que são os mais chuvosos e correspondem às estações da primavera e verão na região Sul do país (CEPED UFSC, 2013).

3.4. SUSCETIBILIDADE, PERIGO, AMEAÇA, RISCO E VULNERABILIDADE

Termos como “suscetibilidade” e “risco” são frequentemente utilizados em trabalhos envolvendo desastres naturais, para caracterizar diferentes condições de uma área ou de uma população em relação a esses fenômenos. Esses termos nem sempre são utilizados de forma ideal na bibliografia, e sua correlação com termos da língua inglesa nem sempre é exata, mas algumas definições amplamente utilizadas no Brasil são apresentadas a seguir.

Segundo CPRM e IPT (2014), a “suscetibilidade” (*susceptibility*) corresponde à predisposição de um terreno à ocorrência de um determinado fenômeno. Essa predisposição está relacionada à presença e interação dos agentes predisponentes discutidos anteriormente, e a áreas com maior probabilidade de ocorrência de um fenômeno (ex: movimento de massa) é atribuído um maior grau de suscetibilidade à ocorrência de tal fenômeno.

O termo “perigo” (*hazard*), por sua vez, designa uma condição na qual existe um potencial para ocorrência de consequências negativas sobre um conjunto de elementos expostos (pessoas, edificações, serviços, etc.) em um determinado período de tempo. Está ligado ao conceito de “ameaça”, que corresponde ao processo do meio físico que pode vir a causar essas consequências (CPRM e IPT, 2014). Uma moradia colocada abaixo de uma encosta instável em um período de chuvas intensas, por exemplo, representa uma situação de perigo com ameaça de movimentos de massa.

Ainda segundo CPRM e IPT (2014, p. 3), o termo “risco” (*risk*) “corresponde a uma medida da ameaça e das consequências (financeiras, bens, vidas) que esta poderá causar em um dado intervalo de tempo”. Dessa forma, pode-se dizer que o risco expressa os possíveis efeitos adversos causados por um fenômeno ou processo sobre os elementos expostos. Esses efeitos adversos levam em conta a “vulnerabilidade” (*vulnerability*) dos elementos expostos, que é o

grau de perda (como o valor dos danos materiais em relação de seu valor total ou a probabilidade de que uma vida em particular seja perdida) que pode vir a ser sofrida pelos elementos expostos em decorrência de um desastre natural (FELL *et al.*, 2008).

3.5. INVENTÁRIOS DE DESLIZAMENTOS

Inventários de deslizamentos são produtos, muitas vezes concebidos na forma de mapas, que registram a distribuição espacial de certos movimentos de massa ocorridos em uma determinada área, podendo incluir também informações a respeito do tipo, data de ocorrência, tamanho, forma e estado de atividade dos movimentos em questão (BAUZYS, 2012).

Um inventário de deslizamentos pode ser classificado com base em sua escala e tipo de mapeamento empregado para sua elaboração. Quanto ao tipo de mapeamento, inventários podem ser divididos em inventários de arquivo – que compilam dados presentes na literatura e/ou outras fontes de registro – e inventários geomorfológicos – que são elaborados a partir da interpretação de fotos aéreas, aliada a trabalhos de campo. Inventários geomorfológicos podem ainda ser subdivididos em históricos (sem diferenciação de idade entre os deslizamentos), de evento (causados por um gatilho específico em um determinado intervalo de tempo), sazonais (deslizamentos ocorridos em uma estação) ou multitemporais (que registram deslizamentos ocorridos em uma mesma área em diferentes períodos de tempo), baseado no intervalo de tempo dos dados obtidos (GUZZETTI *et al.*, 2000; GUZZETTI *et al.*, 2012; OSAKO, 2021).

Quanto à escala, por sua vez, inventários de deslizamentos podem ser classificados em inventários de (a) pequena escala (<1:200.000), que são elaborados a partir de dados da literatura, de órgãos públicos, de jornais e de entrevistas com especialistas; (b) média escala (1:200.000 a 1:25.000), que são confeccionados a partir da interpretação de fotografias aéreas com escalas entre 1:60.000 e 1:10.000, trabalhos de campo e dados históricos; e (c) grande escala (>1:25.000), que são preparados a partir da interpretação de fotografias aéreas com escalas maiores que 1:20.000, imagens de satélite ou modelos digitais com alta resolução espacial, e de extensos trabalhos de campo (GUZZETTI *et al.*, 2000; GUZZETTI *et al.*, 2012).

O mapeamento de deslizamentos geralmente baseia-se no fato que esses fenômenos deixam marcas discerníveis na paisagem, com assinatura morfológica dependente do tipo do movimento em questão, que podem ser identificadas em fotografias aéreas, imagens de satélite e modelos digitais de terreno (GUZZETTI *et al.*, 2012; REICHENBACH *et al.*, 2018).

Segundo Galli *et al.* (2008), inventários de deslizamento podem ser preparados para diversos propósitos, como mostrar a distribuição espacial, tipos e abundância de movimentos

de massa em uma região, demonstrar os efeitos de um único gatilho de deslizamentos (ex: um evento de chuvas intensas ou um terremoto) ou providenciar apoio para a elaboração de modelos de risco ou suscetibilidade a deslizamentos. A qualidade desses inventários é geralmente determinada em comparação com outros inventários, visto que não se tem um critério absoluto para essa validação.

3.6. LÓGICA *FUZZY*

Conjuntos *fuzzy* (ZADEH, 1965) podem ser entendidos como classes de objetos nas quais cada objeto possui um “grau de pertinência”, isto é, um grau de pertencimento ao conjunto, que varia gradualmente entre o não-pertencimento e o pertencimento total (ZADEH, 1996). Eles diferem de conjuntos lógicos tradicionais binários, por exemplo, nos quais um objeto pertence totalmente ou não pertence a um conjunto, sem meio-termo (verdadeiro ou falso, 1 ou 0). Em conjuntos *fuzzy*, um objeto pode pertencer apenas parcialmente a um conjunto, e também pertencer parcialmente a outro conjunto (KOSKO e ISAKA, 1993). Classes em conjuntos *fuzzy* geralmente são representadas por variáveis linguísticas, que assumem a incerteza (*fuzzyness*) dos dados, uma vez que não possuem uma representação matemática definida.

Segundo Zadeh (1973), a abordagem da lógica *fuzzy* possui três características distintas: (a) o uso de variáveis linguísticas (palavras e descritores em linguagem natural) no lugar ou em conjunto com variáveis numéricas, (b) a caracterização de relações simples entre variáveis através de declarações *fuzzy* condicionais e (c) a caracterização de relações complexas entre variáveis através de algoritmos *fuzzy*.

O principal objetivo da lógica *fuzzy* é lidar com dados contendo algum tipo de incerteza. Os dados de entrada passam por um processo de “fuzzyficação”, no qual são atribuídas a eles variáveis linguísticas, que permitem a consideração das incertezas no modelamento matemático. A essas variáveis é então atribuído um grau de pertinência, e esses graus de pertinência são relacionados usando-se algoritmos (ou operadores) *fuzzy* para gerar um resultado (SILVA JR., 2015).

4. ESTUDOS SOBRE DESLIZAMENTOS NO VALE DO ITAJAÍ

Em novembro de 2008, um intenso evento pluviométrico foi responsável pelo desencadeamento de inúmeras ocorrências de movimentos de massa e inundações, atingindo todo o leste de Santa Catarina e configurando-se como o maior desastre natural da história do estado, no qual 63 municípios decretaram Situação de Emergência e 14 decretaram Estado de Calamidade Pública. A mesorregião do Vale do Itajaí, especialmente nas áreas do médio e baixo vale e nas imediações do Morro do Baú, foi uma das mais afetadas (PARIZOTO, 2014). Desde então, a percepção da vulnerabilidade das populações à ocorrência desses desastres estimulou a realização de numerosos trabalhos por parte da comunidade acadêmica e órgãos governamentais, buscando a compreensão das características físicas e antrópicas ligadas ao desastre de 2008 e também aquelas que poderiam levar à ocorrência de novos desastres no futuro. Esses trabalhos formam uma importante base de dados sobre as características físicas e a suscetibilidade a deslizamentos no Vale do Itajaí, e suas contribuições foram imprescindíveis para a realização deste estudo. Alguns desses trabalhos são sumarizados a seguir.

Diante do ocorrido em 2008 e em parceria com diversos órgãos governamentais, um extenso estudo de avaliação das áreas afetadas pelos movimentos de massa no Vale do Itajaí foi elaborado por uma equipe multidisciplinar de profissionais, sob o projeto de “Resposta ao Desastre de Santa Catarina no Ano de 2008”, com o objetivo de apoiar os municípios atingidos pelo desastre na tomada de decisões. Esse estudo culminou na elaboração de um relatório contendo dados e recomendações a respeito de diversas áreas afetadas (CEPED UFSC, 2009).

Tomazzoli, Flores e Bauzys (2009), trabalharam com a caracterização dos movimentos de massa ocorridos no entorno do Morro do Baú no desastre de 2008, observando que os escorregamentos translacionais foram os principais movimentos desencadeados na área, estando principalmente relacionados às rochas metamórficas do CGSC, em locais com solos espessos associados a altas declividades, densa vegetação e influência estrutural de falhas. Esses autores notam, ainda, que esses processos ocorreram majoritariamente de forma natural, com pouca influência antrópica em seu desencadeamento.

Flores, Pellerin e Égas (2009) trabalharam na caracterização dos movimentos de massa ocorridos nos bairros Belchior Baixo e Sertão Verde do município de Gaspar, identificando as características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e os processos relacionados à ocorrência desses movimentos, além de realizar a setorização de risco a novos desastres. De forma geral, observaram que os deslizamentos no bairro Belchior Baixo ocorreram

principalmente em conglomerados da Bacia do Itajaí, havendo também um único escorregamento de grandes proporções, que resultou em dois óbitos, desenvolvido sobre o manto de alteração de rochas gnáissicas do CGSC. No Bairro Sertão Verde, por outro lado, identificaram uma maior relação dos movimentos de massa ocorridos em rochas metassedimentares da Bacia do Itajaí com o mergulho orientado para norte, sendo as encostas voltadas para norte as mais atingidas pelo desastre.

Bauzys (2010) trabalhou na identificação das cicatrizes de deslizamentos ocorridos na bacia do Ribeirão Belchior, em Gaspar, durante o desastre de 2008. A autora também analisou os fatores físicos e antrópicos que poderiam contribuir para a suscetibilidade a deslizamentos na área, observando uma maior ocorrência de movimentos de massa em áreas com declividades entre 25 e 45° e com cambissolos álicos profundos e permeáveis desenvolvidos sobre gnaisses do CGSC.

Santos e Marimon (2011), por sua vez, realizaram a caracterização dos movimentos de massa ocorridos na microbacia do Rio Itoupava, no município de Rio do Sul. Essas autoras chegaram à conclusão que os relevos colinosos da Formação Rio do Sul na área propiciam principalmente o desenvolvimento de rastejos e escorregamentos, enquanto que as escarpas da Formação Rio Bonito propiciam a ocorrência de quedas de blocos.

Tomazzoli *et al.* (2012) realizaram extensos mapeamentos geológicos, geomorfológicos, de uso e cobertura do solo e de cicatrizes de deslizamentos para delimitação das áreas de suscetibilidade e risco a deslizamentos e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves a partir de métodos estatísticos. Esses autores identificaram também as características geológicas, geomorfológicas, pedológicas e altimétricas relacionadas à ocorrência dos deslizamentos, concluindo que grande parte dos planos de ruptura desenvolvidos na área encontravam-se no horizonte pedogenético C e no contato solo-rocha, em solos com textura areno-siltosa. Segundo os autores, a maior ocorrência de movimentos de massa esteve ligada também a encostas mais declivosas, orientadas para nordeste (sendo a direção sudoeste aquela com menor ocorrência de movimentos), côncavas, com solos desenvolvidos sobre arenitos arcoseanos e em rochas máficas-ultramáficas do CGSC e em áreas ocupadas para cultivo de cana-de-açúcar, cultivo de palmito e pecuária.

Bini (2012) analisou as cicatrizes de deslizamentos presentes nas microbacias do Saltinho, Belchior Baixo, Sertão e Porto Arraial, no município de Gaspar, a fim de identificar os fatores condicionantes responsáveis pelos movimentos de massa ocorridos no desastre de 2008. A autora associou os deslizamentos principalmente às rochas sedimentares da Bacia do

Itajaí, setores de média e alta encosta, feições de outeiro e segmentos côncavos das encostas, notando também a influência de obras de corte na deflagração dos movimentos.

Correia *et al.* (2013) utilizaram o método de pesos de evidência para mapear áreas suscetíveis a deslizamento na região do baixo Vale do Itajaí, utilizando fatores de geologia, declividade, orientação das encostas, formas de rampa em planta e perfil, *Topographic Wetness Index* (TWI), *Stream Power Index* (SPI), direção de fluxo e índice de vegetação para a análise. Os autores identificaram uma maior correlação dos deslizamentos principalmente com inclinações entre 20 e 35°, orientação de encostas para o norte, curvatura em perfil divergente, direção de fluxo sudeste e sul, NDVI entre 0,7 e 0,85 e litologias do CGSC.

Sbroglia e Higashi (2013), por outro lado, realizaram um mapeamento geotécnico na microbacia do Ribeirão Baú, no município de Ilhota, a fim de identificar as unidades com maior propensão à ocorrência de movimentos de massa. Esses autores chegaram à conclusão que as áreas de Cambissolos desenvolvidos sobre as rochas gnáissicas do CGSC, registravam a maior ocorrência de movimentos de massa, estando muitas vezes associadas a altas declividades, espesso manto de intemperismo e ampla rede de fraturas e falhas.

Lima (2013) realizou o mapeamento de cicatrizes de deslizamento na bacia do Ribeirão Belchior, complementando o inventário de Bauzys (2010), e utilizou dados cartográficos para determinar a suscetibilidade da área a deslizamentos translacionais a partir de um modelo probabilístico. O autor observou que maiores declividades apresentaram maior influência na deflagração de movimentos gravitacionais de massa, que se desenvolveram principalmente em encostas côncavas, com pouca correlação com a orientação das vertentes.

Reginatto (2013) identificou cicatrizes de deslizamentos na bacia do Rio Cunha, no município de Rio dos Cedros, a fim de realizar uma caracterização geotécnica das áreas afetadas. A autora concluiu que os Cambissolos de gnaiss granulítico apresentam maior ocorrência de deslizamentos, em especial de fluxos de detritos.

Parizoto (2014) buscou identificar os elementos físicos e antrópicos associados ao desastre de 2008 na região do Morro do Baú. O autor também utilizou modelos probabilísticos, aliados ao inventário de deslizamentos e dados de geologia, pedologia, altimetria, declividade, orientação das encostas e distância de rios e estradas para gerar cartas de suscetibilidade a deslizamentos da área. O estudo revelou uma maior ocorrência de movimentos gravitacionais de massa em gnaisses e rochas máficas-ultramáficas do CGSC e arenitos arcoseanos da Bacia do Itajaí, vertentes voltadas para nordeste e áreas mais elevadas.

Kormann (2014), por sua vez, analisou a expansão urbana no município de Blumenau e sua relação com o meio físico para formação de áreas de risco a deslizamentos, identificando a porção sul do município como mais suscetível à ocorrência de movimentos de massa.

Correia (2015) comparou a efetividade dos modelos de pesos de evidência, lógica *fuzzy* e índice de suscetibilidade a deslizamentos (ISD) ao aplicá-los para gerar mapas de suscetibilidade a movimentos de massa na região do baixo Vale do Itajaí. O autor obteve resultados especialmente satisfatórios através do método ISD, e identificou o terço superior das vertentes como sendo mais propício à geração de deslizamentos.

Coutinho (2016) utilizou a metodologia de pesos de evidência para analisar a suscetibilidade a deslizamentos na área urbana do município de Rodeio, usando dados de declividade, unidades geotécnicas, geologia e orientação das vertentes. A autora identificou as áreas de mais alta suscetibilidade como aquelas contendo Cambissolos em gnaisses, declividades entre 25 e 45° e vertentes orientadas para leste, norte, nordeste e sudeste.

Sbroglia *et al.* (2016) utilizaram o método SHALSTAB para mapear áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, no município de Ilhota, utilizando um inventário de cicatrizes de deslizamentos para realizar a validação do modelo.

Mallmann (2018) utilizou o método da lógica *fuzzy* para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamento no bairro Nova Esperança, em Blumenau, chegando à conclusão que as áreas com conglomerados, arenitos grossos e gnaisses são mais propensas à ocorrência de movimentos de massa. O autor atenta, ainda, para a elevada quantia de deslizamentos ocorridos no contato entre o CGSC e a Bacia do Itajaí.

Schramm (2019), por sua vez, também utilizou a lógica *fuzzy* para identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos em Blumenau, dando enfoque à microbacia do Córrego Gebien. Esse autor identificou que áreas de solo exposto e área urbana, assim como áreas com declividade superior a 30%, sobre siltitos e arenitos muito finos das Formações Ribeirão do Bode e Ribeirão Carvalho, apresentam a maior suscetibilidade a movimentos de massa.

Osako (2021) trabalhou na atualização do inventário de movimentos de massa do município de Brusque a partir da interpretação de ortofotos e modelos digitais de superfície e elevação. A autora identificou que a maior porcentagem dos deslizamentos na área afeta rochas metapsamíticas, metapelíticas e granitoides do Complexo Metamórfico Brusque, e as classes de alta suscetibilidade a movimentos de massa estão dispostas em altitudes entre 70 e 300 m, declividades acima de 25° e solo raso.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. MATERIAIS

Revisão bibliográfica: Foram consultados trabalhos na forma de artigos, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, livros, mapas, relatórios técnicos e outras publicações existentes e disponíveis, com o intuito de estabelecer e reforçar o conhecimento a respeito, principalmente, de movimentos gravitacionais de massa, características físicas da área de estudo, mapeamento de cicatrizes de deslizamentos, análise de suscetibilidade a movimentos de massa e outros tópicos relevantes para a elaboração do trabalho.

Dados georreferenciados: Foram utilizados dados espaciais na forma de arquivos vetoriais e matriciais, que consistem em:

- **Mapa geológico** em escala 1:500.000, elaborado pela CPRM (2014) e disponibilizado em formato *shapefile*;
- **Ortofotos** com resolução espacial de 0,4 m e datadas de 2010, disponibilizadas em formato *geotiff* pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social de Santa Catarina (SDS-SC) na plataforma SIG-SC;
- **Modelo digital de terreno (MDT) e de superfície (MDS)** com resolução espacial de 1 m, também disponibilizados em formato *geotiff* pela SDS-SC;
- **Dois conjuntos de imagens do sensor WPM do satélite CBERS-4A** com resolução espacial de 8 m para as bandas espectrais e 2 m para a banda pancromática, datadas de setembro de 2020 e abril de 2021, disponibilizadas pela Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em formato *geotiff*;
- **Trechos de drenagem, cursos d'água e bacias hidrográficas otocodificadas**, em formato *GeoPackage*, disponibilizadas pela Agência Nacional das Águas (ANA) em escala 1:250.000;
- **Base cartográfica do estado de Santa Catarina** em escala 1:25.000, disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE em formato *shapefile*;
- **Principais bacias hidrográficas de Santa Catarina**, em formato *shapefile*, disponibilizadas pela SDS-SC;
- **Unidades geomorfológicas do Brasil** em escala 1:250.000, disponibilizadas pelo IBGE em formato *shapefile*.

Softwares: Foram utilizados os *softwares* QGIS (gratuito) e ArcGIS Pro (licença estudantil) para integração e análise dos dados em ambiente SIG. O *software* eCognition foi utilizado para classificação de uso e ocupação do solo na área de estudo. Para organização dos dados numéricos, cálculo de graus de pertinência e confecção de gráficos, foi utilizado o Microsoft Office Excel. Um interpretador Python 3.7 também foi utilizado para geração de *scripts* de automação do geoprocessamento, diagramas de roseta e estereogramas.

Equipamento de campo: Foram utilizados em campo uma bússola Brunton e um GPS Garmin.

5.2. METODOLOGIA

Para a determinação da suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, optou-se pela utilização do método da lógica *fuzzy*, que se baseia na representação de dados espaciais em ambiente SIG como objetos de conjuntos *fuzzy*, aos quais são atribuídos graus de pertinência, representando o grau de pertencimento do objeto ao conjunto. Neste caso, os objetos são as classes de fatores condicionantes a deslizamentos, utilizadas na forma de arquivos matriciais cobrindo toda a área de estudo, e o grau de pertinência atribuído a cada uma dessas classes representa, de forma geral, seu nível de influência na suscetibilidade a deslizamentos. Os arquivos matriciais contendo os graus de pertinência são então integrados utilizando-se um operador *fuzzy*, que calcula, *pixel a pixel*, o grau de suscetibilidade.

O método da lógica *fuzzy* é, normalmente, um método baseado no conhecimento do especialista (*knowledge-driven*), isto é, os graus de pertinência são ponderados pelo analista ou calculados por funções de pertinência escolhidas conforme seu conhecimento prévio do assunto (CORREIA, 2015). Neste trabalho, entretanto, optou-se pelo cálculo dos graus de pertinência a partir da Relação de Frequência, que representa a correlação entre uma classe de fator condicionante e a ocorrência de movimentos de massa pretéritos em sua extensão. Essa abordagem baseia-se no pressuposto que movimentos de massa futuros têm maiores chances de ocorrer sob condições similares àquelas que levaram à instabilidade no passado (GUZZETTI *et al.*, 2012). A Relação de Frequência é um método estatístico baseado em dados (*data-driven*), e sua utilização ajuda a diminuir a subjetividade na atribuição dos graus de pertinência (CORREIA, 2015).

A Figura 18, a seguir, mostra o ordenamento das etapas de realização do trabalho.

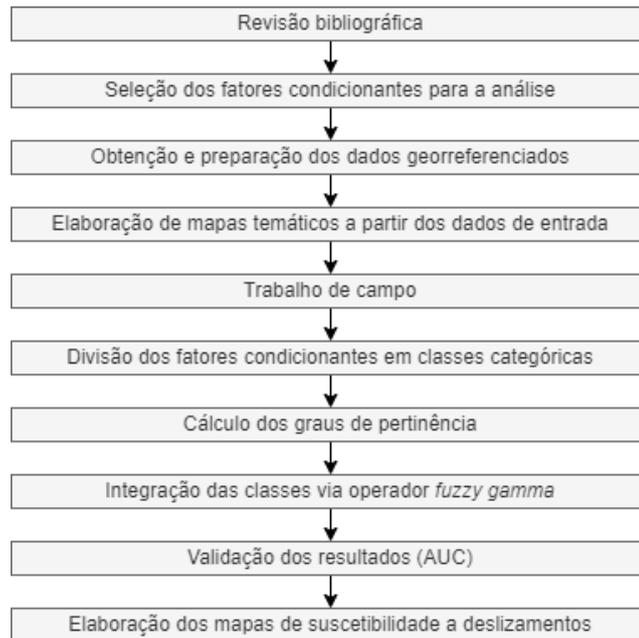


Figura 18 – Fluxograma de etapas do trabalho. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1. Seleção dos Fatores Condicionantes para Análise de Suscetibilidade

Os seis fatores condicionantes selecionados para análise de suscetibilidade na área de estudo foram: litologia, declividade, uso e ocupação do solo, distância de estruturas (falhas/fraturas), orientação das encostas e altitude. Essa seleção foi feita baseando-se no emprego de cada fator em trabalhos similares (SCHRAMM, 2019; MALLMANN, 2018; ANBALAGAN *et al.*, 2015; SHAHABI *et al.*, 2015; KHAN *et al.*, 2019; SILVA JR., 2016) e na disponibilidade dos dados.

5.2.2. Preparação dos Dados

Em uma etapa inicial, os dados vetoriais e matriciais obtidos de fontes externas (listados na seção de Materiais) foram reunidos e organizados no software ArcGIS Pro, onde realizou-se o recorte para a região da área de estudo e reprojeção para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 UTM 22S.

As imagens multiespectrais do satélite CBERS-4A foram agrupadas através da ferramenta *Composite bands*, e então foi realizada a fusão com a banda pancromática através da ferramenta *Create Pansharpened Dataset* para gerar composições coloridas RGB com resolução espacial de 2 m. Essas imagens foram então georreferenciadas novamente para melhor se ajustar às ortofotos da SDS-SC e eliminar deslocamentos entre os dois conjuntos de dados (Figura 19).

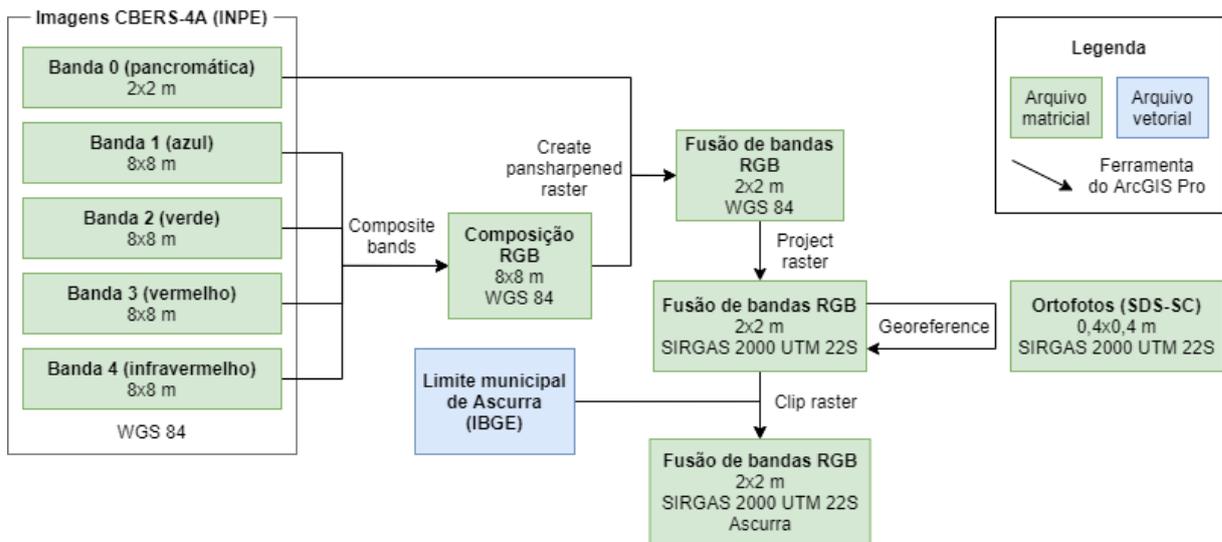


Figura 19 – Fluxograma das etapas de processamento digital de imagens do satélite CBERS-4A. Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo digital de terreno (MDT) foi obtido da plataforma SIG-SC na forma de 48 imagens, que foram unidas em mosaico para compor uma cena abrangendo toda a região da área de estudo. Esse mosaico foi realizado através da ferramenta *Mosaic to new raster*, utilizando-se o parâmetro “máximo” para as áreas de sobreposição. Em uma dessas imagens (SG-22-Z-B-IV-3-SO-D), foi observada a presença de um ruído linear de 8-10 metros de largura com direção N-S e *pixels* com números digitais abaixo do esperado para o relevo. Esse ruído foi removido através da aplicação de um *script* em Python, que efetuou o cálculo dos valores dos *pixels* (altitude) com uma progressão linear entre ambos os lados da faixa afetada (Figura 20). Embora a informação original de altitude nos *pixels* dessa faixa não possa ser recuperada, a correção evita anomalias nos mapas de declividade e de orientação das encostas gerados a partir do MDT, que poderiam afetar a análise de suscetibilidade a deslizamentos.

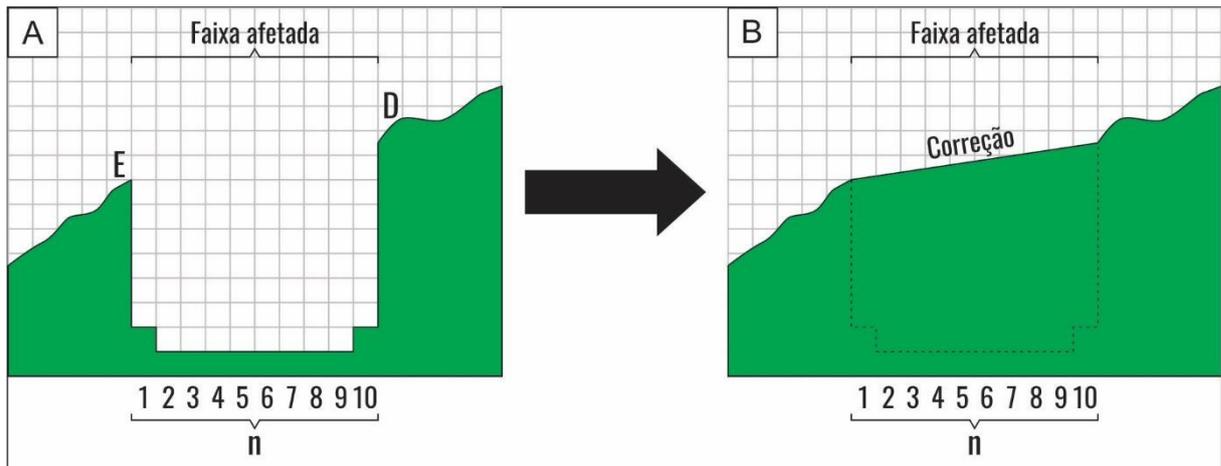


Figura 20 – Correção aplicada ao ruído no MDT. A) Representação esquemática em perfil transversal da faixa com ruído observada na imagem SG-22-Z-B-IV-3-SO-D do MDT da área de estudo. B) Representação esquemática da correção aplicada à imagem. Fonte: Elaborado pelo autor.

A fórmula da correção aplicada em cada *pixel* do ruído pode ser conferida na equação a seguir:

$$z = E + \frac{D - E}{11} \cdot n \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

z: Valor de altitude do *pixel*.

E: Valor de altitude do *pixel* à esquerda (oeste) da faixa do ruído.

D: Valor de altitude do *pixel* à direita (leste) da faixa do ruído.

n: Número da coluna da faixa afetada, da esquerda para a direita.

11: Largura da faixa a ser corrigida mais um (em *pixels*).

5.2.3. Altitude, declividade e orientação das encostas

A partir do MDT da região da área de estudo, foi utilizada a ferramenta *Surface parameters* do ArcGIS Pro para gerar mapas de declividade e de orientação das encostas. Como os *pixels* do MDT representam elevação, este foi utilizado como mapa de altitude. Foram gerados também mapas de relevo sombreado, que foram utilizados complementarmente na elaboração de outros mapas temáticos (Figura 21).

Embora a resolução espacial do MDT seja originalmente de 1 metro, optou-se por reamostrá-lo, assim como a todos os arquivos derivados dele, para arquivos com tamanho de

pixel de 2 metros, a fim de padronizar o tamanho de *pixel* de todos os arquivos *raster* utilizados no trabalho conforme a menor resolução de dados disponível.

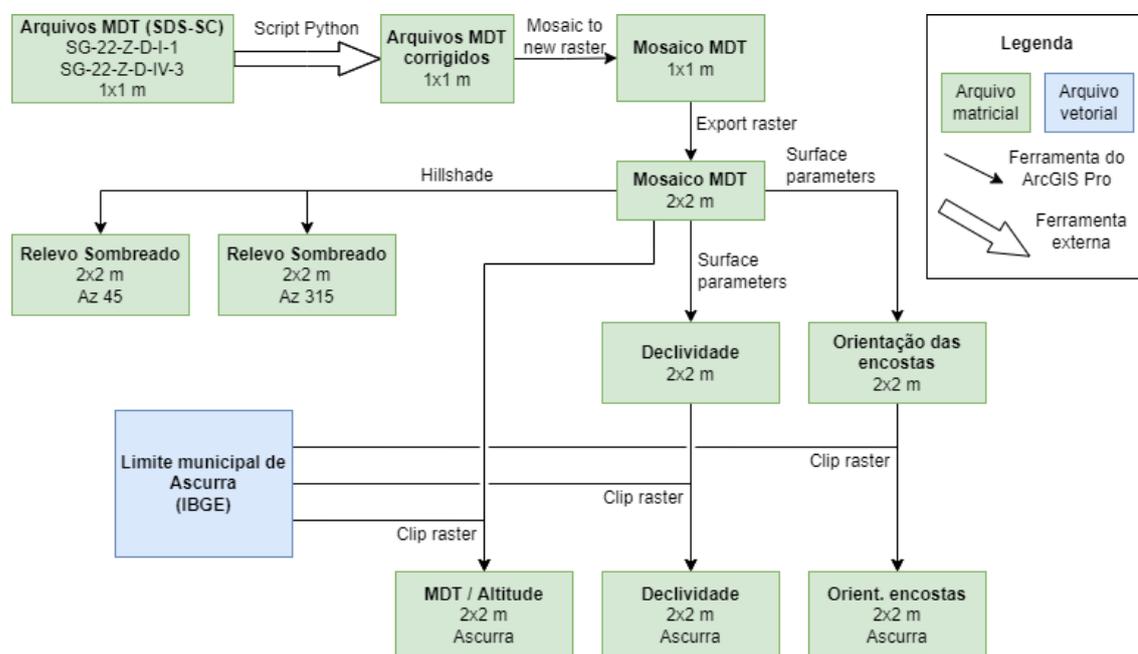


Figura 21 – Fluxograma das etapas de processamento para geração de mapas de altitude, declividade, orientação das encostas e relevo sombreado a partir do MDT. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.4. Litologia

O mapa litológico para a área de estudo foi recortado a partir de arquivo vetorial disponibilizado de forma digital pela CPRM (2014), contendo unidades com a mesma distribuição espacial do mapa geológico do estado de Santa Catarina.

5.2.5. Atualização do Inventário de Deslizamentos

Quando um deslizamento ocorre, ele modifica a topografia da superfície, deixando uma assinatura distinguível, que depende do tipo, magnitude e extensão do processo. Devido a isso, a análise e interpretação visual da superfície topográfica a partir de modelos digitais de terreno e de superfície de alta resolução é um dos métodos mais comuns e promissores para a detecção e mapeamento de deslizamentos em grandes áreas, sendo diretamente comparável à interpretação visual de fotografias aéreas em preto e branco com estereoscopia. Esse método é especialmente adequado para a identificação de escorregamentos rotacionais profundos, escorregamentos planares rasos e profundos e fluxos de detritos (GUZZETTI *et al.*, 2012).

A ocorrência de um deslizamento também é capaz de modificar a cobertura do terreno, alterando as propriedades ópticas da superfície. Isso possibilita que sensores remotos de satélites sejam utilizados para a identificação e mapeamento de deslizamentos. Imagens de

sensores ópticos (pancromáticos e multiespectrais), geralmente projetadas ou ortorretificadas, são usadas nesse sentido principalmente para detecção de deslizamentos através de técnicas visuais ou analíticas, enquanto imagens obtidas por radares de abertura sintética são preferíveis para a detecção e monitoramento de deformações causadas por movimentos de massa lentos. Apesar disso, a assinatura espectral de um deslizamento é muitas vezes ambígua, tornando esse método desafiador. Em geral, a análise visual é particularmente efetiva para o mapeamento de deslizamentos recentes em florestas, onde o movimento de massa deixa sinais claros de sua ocorrência (GUZZETTI *et al.*, 2012).

Dessa forma, para elaboração do inventário de deslizamentos, foi feita a interpretação visual a partir, principalmente, de ortofotos, modelo digital de superfície (MDS) e imagens de satélite do CBERS-4A. O MDS foi utilizado na forma de dois arquivos de relevo sombreado, com elevação da iluminação em 45° e azimute solar em 45° e 315°. Como as ortofotos e MDS são produtos do mesmo levantamento, foi possível utilizá-los em conjunto para a identificação e traçado das cicatrizes (Figura 22). O procedimento operacional padrão para esse traçado foi: 1) identificação da cicatriz a partir das ortofotos, com base em evidências visuais (solo exposto, manchas de vegetação rasteira em áreas de floresta, etc.); 2) conferência da orientação da encosta em arquivo gerado a partir do MDT; 3) identificação dos contornos da cicatriz no MDS; e 4) traçado da cicatriz a partir das ortofotos e do MDS.

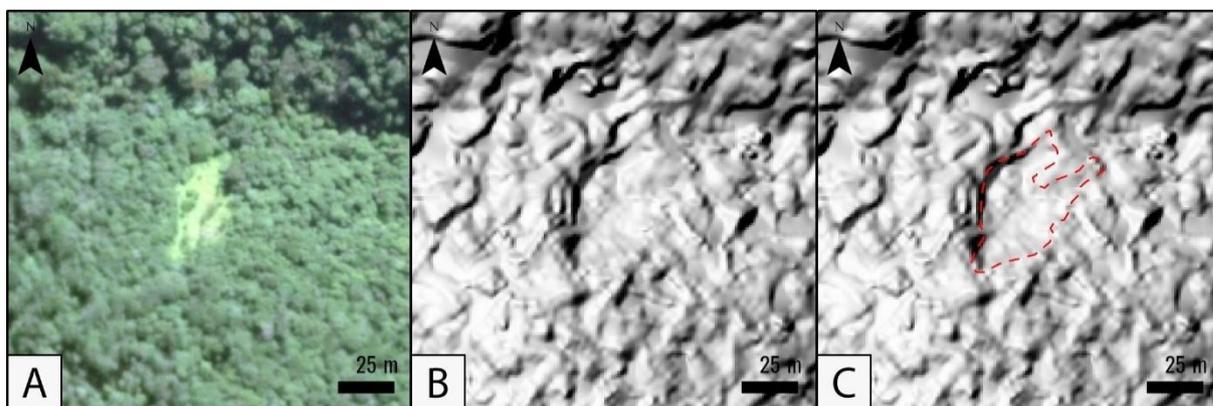


Figura 22 – Exemplo de cicatriz de deslizamento identificada a partir das ortofotos e do MDS. A vertente em questão tem caimento para NE. A) Aparência da cicatriz nas ortofotos (área sem vegetação). B) Resposta da cicatriz no MDS, com relevo sombreado a 315°. C) Traçado resultante (linha vermelha tracejada). Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da fusão de bandas do CBERS-4A, não há imagem temporal correspondente para a superfície (MDS), e apenas as cicatrizes mais claramente visíveis, em geral presentes em áreas de vegetação arbórea, puderam ser identificadas por meio de evidências visuais. No caso

de deslizamentos recentes, também foi possível confirmar a presença da cicatriz em função da presença de solo exposto, conforme exemplificado na Figura 23.

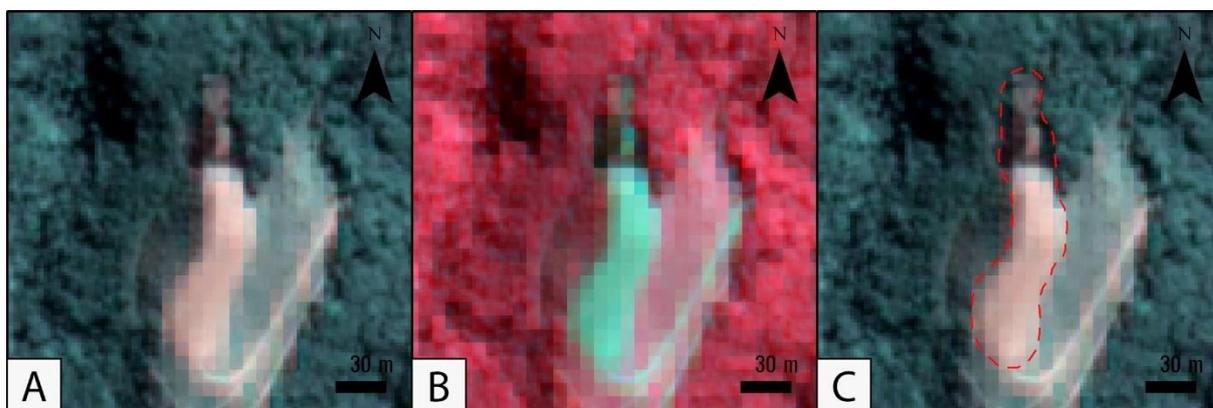


Figura 23 – Resposta espectral de deslizamento recente nas imagens do CBERS-4A. A) Composição RGB com as bandas 3 (vermelho), 2 (verde) e 1 (azul) (cores naturais). B) Composição RGB com as bandas 4 (infravermelho próximo), 3 (vermelho) e 2 (verde), ressaltando áreas vegetadas em vermelho e áreas sem vegetação em verde e azul. C) Traçado resultante do deslizamento. Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das cicatrizes identificadas por interpretação das imagens, um total de dois deslizamentos, presentes na região central da área de estudo, foram extraídos do trabalho de Hoelzel e Bellettini (2015). Posteriormente, também foram adicionados ao inventário deslizamentos recentes mapeados durante o trabalho de campo.

5.2.6. Traçado de Lineamentos e Estruturas Planares

O termo “lineamento” foi cunhado para referir-se a feições lineares do relevo, causadas por juntas e falhas, que revelam a estrutura do embasamento. Essa definição pode ser expandida para feições mapeáveis através de produtos de sensoriamento remoto, mas que não correspondem a nenhuma feição em superfície, visto que podem estar encobertas por estratos mais jovens. Lineamentos podem ser positivos (cumes lineares) ou negativos (vales). Lineamentos negativos geralmente representam juntas, falhas e zonas de cisalhamento, enquanto lineamentos positivos retilíneos podem ser interpretados como diques ou enxames de diques. Lineamentos com leve curvatura ou subparalelos podem ainda indicar a foliação ou acamamento das rochas (RAMLI *et al*, 2010; KOCH e MATHER, 1997).

Para a identificação dos lineamentos presentes na área de estudo, foram utilizados dois arquivos de relevo sombreado, gerados a partir do MDT, com azimute solar em 45° e 315° e ângulo de elevação em 45°. Os lineamentos foram então traçados como linhas sobre o relevo sombreado, diferenciando-se os positivos dos negativos.

O mapa de lineamentos resultante foi então utilizado, em conjunto com informações presentes na literatura (SILVA e DIAS, 1981; ROSTIROLLA *et al.*, 1999; SCHROEDER, 2006; GUADAGNIN *et al.*, 2010; BASEI *et al.*, 2011; CPRM, 2014) e dados de campo para identificar e traçar as estruturas geológicas planares presentes na área de estudo.

5.2.7. Classificação de Uso e Ocupação do Solo

A classificação do uso e ocupação do solo na área de estudo foi realizada através do método GEOBIA (*Geographic Object-Based Image Analysis*), ou simplesmente OBIA, que consiste em uma técnica na qual o analista define um conjunto de regras para segmentar e classificar porções de uma imagem.

O primeiro passo desse método é o agrupamento de *pixels* com características similares, formando objetos que representam entidades geográficas e possuem atributos próprios, calculados a partir dos atributos dos *pixels* que os compõem (BLASCHKE *et al.*, 2014). Essa segmentação se assemelha, de certa forma, ao modo como a mente humana separa diferentes segmentos de uma cena, e, portanto, seus resultados são muito mais intuitivos quando comparados aos de técnicas de classificação baseadas em *pixels* individuais. O segundo passo é a classificação, na qual o analista define conjuntos de regras que atribuem classes a objetos a partir de suas características espectrais, de forma, de suas relações com objetos vizinhos, etc. A definição do conjunto de regras pode ser extremamente difícil para casos em que se analisa uma realidade geográfica heterogênea, como quando se objetiva classificar simultaneamente uma grande variedade de tipos de objetos, mas é facilitada nos casos em que se pretende classificar fenômenos que seguem determinados padrões ou feições claramente distinguíveis na paisagem. Por fim, o terceiro passo é a pós-classificação, na qual o analista elimina erros evidentes na classificação. Essa etapa pode ser realizada por controle visual, inspeção em campo ou comparação com a imagem original, sendo predominantemente uma etapa de trabalho manual e demorada. Uma etapa de validação também pode ser executada, a fim de calcular a precisão da classificação. Essa validação é geralmente feita utilizando-se pontos de controle com localização e conteúdo temático conhecidos (VELJANOVSKI, KANJIR e OŠTIR, 2011).

Para a área de estudo, a classificação foi realizada utilizando-se os seguintes dados:

- Uma imagem do satélite CBERS-4A com resolução espacial de 2 metros, datada de setembro de 2020, contendo a fusão (*pansharpen*) da banda pancromática e das bandas espectrais do sensor WPM;

- Arquivos de NDVI (índice de vegetação, conforme a Equação 2) e NDWI (índice de água, conforme a Equação 3), gerados a partir da imagem de satélite com a ferramenta *Band arithmetic* do ArcGIS Pro;

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

(Eq. 2)

Onde NIR é o valor do *pixel* na banda do infravermelho próximo e R é o valor do *pixel* na banda do vermelho.

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}$$

(Eq. 3)

Onde G é o valor do *pixel* na banda do verde e NIR é o valor do *pixel* na banda do infravermelho próximo.

A segmentação foi feita no *software* eCognition, utilizando-se o parâmetro de escala 60 para os objetos gerados. Essa escala de objetos foi a que melhor se ajustou à enorme heterogeneidade das diversas entidades geográficas presentes na área.

A definição das classes foi a seguinte:

- **Corpos d'água:** Compreende rios, açudes e outras massas d'água visíveis na superfície da área. Corpos d'água com pouca área superficial distinguível, como pequenos riachos, não foram englobados nesta classe;
- **Vegetação:** Formações arbóreas primárias, secundárias e artificiais, incluindo também áreas de silvicultura;
- **Campos e pastagens:** Uma classe abrangente que inclui campos de ocorrência natural, áreas de pastagem para pecuária e similares;
- **Agricultura:** Áreas destinadas ao cultivo agrícola, que, na área de estudo, correspondem principalmente a plantações de arroz irrigado;
- **Área edificada:** Áreas urbanas, vilas e entornos de benfeitorias rurais.

Na etapa inicial de classificação, objetos representando cada classe foram amostrados manualmente no eCognition, e as suas médias de características espectrais – banda do vermelho, verde, azul, infravermelho próximo (NIR), NDVI, NDWI e brilho – foram anotadas

em uma tabela. Através dessa tabela, foram identificadas características comuns de cada classe, que foram então utilizadas para a definição de regras de classificação.

Na etapa de classificação, através da aplicação de regras, foram separadas três classes: corpos d'água, vegetação e área antropizada (superclasse temporária que incluiu as classes de campos e pastagens, agricultura e área edificada).

Em seguida, realizou-se a etapa de pós-classificação manual, onde foram separadas as classes da área antropizada e realizou-se o refinamento da classificação da vegetação e corpos d'água.

A validação foi realizada através do cálculo do Coeficiente Kappa, que mede a proporção de concordância entre dois conjuntos de dados após remover-se a proporção de concordância que se esperaria obter por acaso. O Coeficiente Kappa é dado tipicamente em uma escala de 0 a 1, na qual 1 representa concordância total dos dados. Ele pode ser calculado através da seguinte equação (FOODY, 1992):

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde P_o é a proporção observada de concordância e P_e é a proporção de concordância que se espera ocorrer randomicamente.

Para o cálculo do Coeficiente Kappa, foram distribuídos manualmente sobre as imagens do CBERS-4A (utilizadas para a classificação) 250 pontos, sendo 50 pontos colocados sobre cada classe de uso e ocupação do solo. Os pontos contendo as classes observadas nas imagens foram então comparados com o mapa de classificação de uso e ocupação do solo, e os resultados foram dispostos em uma matriz de erro, ou matriz de confusão, a partir da qual realizou-se o cálculo.

5.2.8. Trabalhos de Campo

Uma etapa de trabalhos de campo foi realizada entre os dias 20 e 22 de outubro de 2021 com o intuito de realizar o reconhecimento geológico da área de estudo, a fim de apoiar a discussão dos resultados e auxiliar a tomada de ajustes nas classes de fatores condicionantes.

O trabalho de campo consistiu principalmente na visita a pontos pré-selecionados para distinguir as características litológicas e estruturais da área e realizar a conferência de deslizamentos mapeados remotamente. Foram realizadas descrições litológicas em afloramentos e medições de atitude de planos estruturais, superfícies de acamadamento (S_0) e

foliações, com intuito de apoiar o mapeamento de falhas e outras estruturas geológicas da área de estudo. Também foram mapeados deslizamentos recentes encontrados durante o trabalho de campo, sendo estes adicionados posteriormente ao inventário de deslizamentos.

5.2.9. Definição das Classes dos Fatores Condicionantes

Os seis fatores condicionantes foram divididos em classes categóricas, no caso dos fatores qualitativos (litologia e uso e ocupação do solo), e intervalos discretos, no caso dos fatores numéricos (orientação das encostas, declividade, altitude e distância de estruturas). Os intervalos foram divididos de forma equidistante. No caso da distância de estruturas, a distância máxima foi definida levando-se em conta as possíveis zonas de influência desse fator na área de estudo.

O fluxograma da Figura 24 mostra os dados utilizados como base para a elaboração dos mapas de classes dos fatores condicionantes e o inventário de deslizamentos.

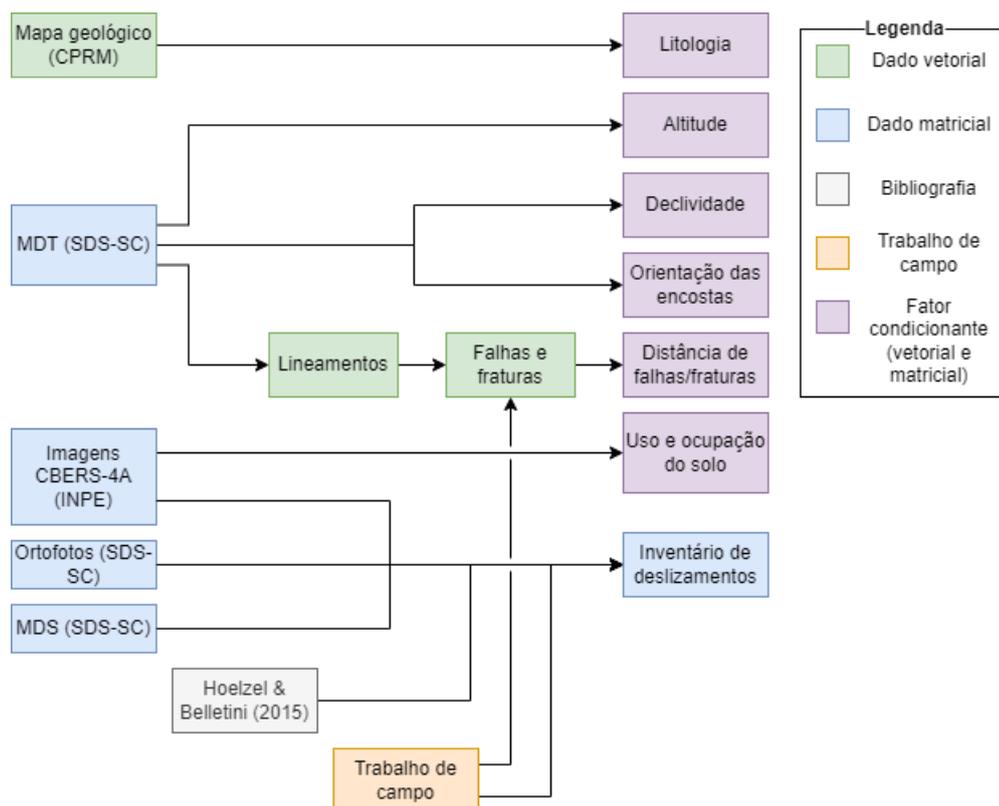


Figura 24 – Fluxograma de dados utilizados para confecção dos mapas de fatores condicionantes e inventário de deslizamentos. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.10. Cálculo dos Graus de Pertinência das Classes

Para o cálculo do grau de pertinência (*fuzzy membership*), utilizou-se como base a Relação de Frequência, que expressa a relação entre o número de deslizamentos ocorridos na

área de uma classe de fator condicionante e a porcentagem da área total que a classe em questão representa (CORREIA, 2015):

$$\text{Relação de Frequência (RF)} = \frac{\text{Número de pontos de deslizamento na classe (\%)}}{\text{Domínio da classe (\%)}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Nesse caso, a área (domínio da classe) foi expressa em *pixels*, e, portanto, todos os arquivos contendo a distribuição espacial das classes foram padronizados em formato *raster*, com 2 metros de tamanho de *pixel* (dessa forma, cada *pixel* representa uma área de 4 m²).

O inventário de deslizamentos foi dividido em dois subconjuntos de dados: pontos de treinamento e de validação. A seleção dos pontos foi feita de forma aleatória, através da aplicação de um *script* Python. Os pontos de treinamento correspondem a 75% dos deslizamentos do inventário, e foram utilizados para o cálculo da relação de frequência, enquanto os pontos de validação (25% dos deslizamentos) foram reservados para uso posterior na etapa de validação.

Os valores de Relação de Frequência foram então normalizados entre 0 e 1, através da Equação 6 (SEMA, GURU e VEERAPPAN, 2017), para gerar os graus de pertinência das classes:

$$\text{Grau de Pertinência} = \frac{x_{RF} - \min_{RF}}{\max_{RF} - \min_{RF}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Nessa equação, x_{RF} é a Relação de Frequência da classe, e \min_{RF} e \max_{RF} são a menor e a maior Relação de Frequência dentre todas as classes, respectivamente.

Após o cálculo dos graus de pertinência, estes foram atribuídos aos mapas de classes de fatores condicionantes através de um *script* Python (Figura 25).

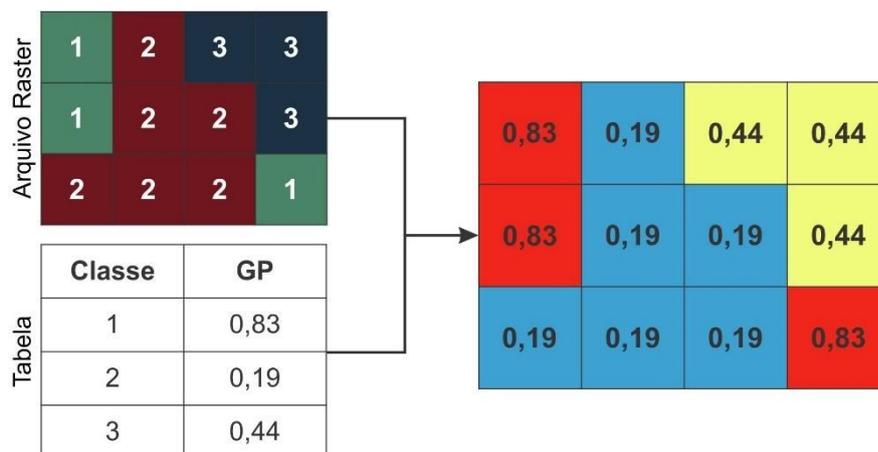


Figura 25 – Exemplo esquemático de uma reclassificação para atribuição de graus de pertinência a um arquivo matricial contendo classes de um fator condicionante. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.11. Integração dos Dados com o Operador *Fuzzy Gamma*

Para o cálculo dos graus de suscetibilidade a deslizamentos, optou-se por utilizar o operador *fuzzy gamma*, que é calculado a partir dos operadores *fuzzy soma* e produto (Equação 7). O valor de *gamma* (γ), dado pelo analista, varia de 0 a 1, e define a importância dos operadores utilizados no cálculo, sendo que 0 corresponde ao produto, 1 corresponde à soma e os valores intermediários representam uma progressão entre os dois operadores (CORREIA, 2015).

$$Fuzzy\ gamma = (Fuzzy\ soma)^\gamma \cdot (Fuzzy\ produto)^{1-\gamma} \tag{Eq. 7}$$

O operador *fuzzy soma* é calculado a partir da soma dos graus de pertinência das classes de fatores condicionantes em cada *pixel* do mapa, conforme a Equação 8. O resultado dessa operação é sempre maior que os valores de entrada, mas nunca excede 1 (CORREIA, 2015).

$$Fuzzy\ soma = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i) \quad \text{onde } u_i \text{ é o valor do pixel na posição } n \tag{Eq. 8}$$

O operador *fuzzy produto*, por sua vez, é calculado pelo produto algébrico entre os graus de pertinência de cada *pixel*, conforme a Equação 9. O resultado dessa operação é sempre menor que os valores de entrada (CORREIA, 2015).

$$Fuzzy\ produto = \prod_{i=1}^n u_i \quad \text{onde } u_i \text{ é o grau de pertinência de cada classe no pixel} \tag{Eq. 9}$$

Os valores de *gamma* escolhidos para o cálculo foram $\gamma = 0,75$ a $\gamma = 0,9$, a cada 0,025 (0,75; 0,775; 0,8; 0,825; 0,85; 0,875; 0,9). Essa escolha foi feita a partir da consulta a trabalhos similares de análise de suscetibilidade a deslizamentos (ANBALAGAN *et al.*, 2015; SHAHABI *et al.*, 2015; SEMA, GURU e VEERAPPAN, 2017; SCHRAMM, 2019), que demonstram que, em geral, valores elevados de *gamma* apresentam resultados melhores.

A integração dos graus de pertinência das classes dos seis fatores condicionantes via operador *fuzzy gamma* foi feita através da ferramenta *Fuzzy overlay* do ArcGIS Pro para gerar mapas contendo o grau de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, conforme exemplificado na Figura 26, a seguir.

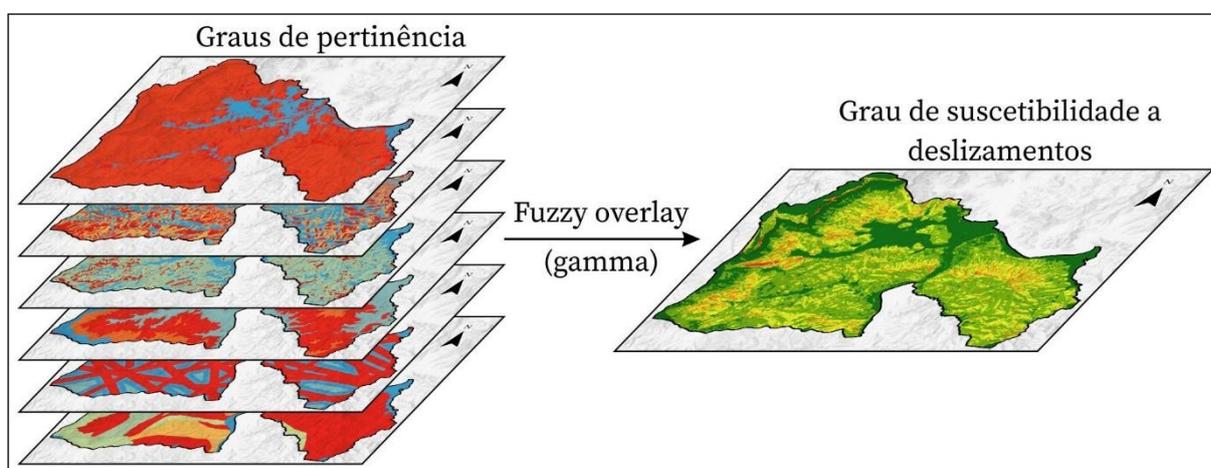


Figura 26 – Representação da integração dos dados para calcular o grau de suscetibilidade a deslizamentos. Os graus de suscetibilidade são calculados, *pixel a pixel*, através da aplicação do operador *fuzzy gamma* (Eq. 5) nos arquivos matriciais contendo os graus de pertinência das classes de fatores condicionantes. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.12. Validação dos Resultados da Integração

A avaliação de acurácia dos produtos de suscetibilidade a deslizamentos foi realizada através dos métodos de *receiver operating characteristic* (ROC) e *area under curve* (AUC). A curva ROC caracteriza a qualidade de predição de um modelo, baseado em sua habilidade de prever corretamente a ocorrência ou não-ocorrência de eventos pré-definidos (SHAHABI *et al.*, 2015). Ela consiste em um gráfico composto pela sensibilidade do modelo (razão entre dados corretamente classificados como positivos e o total de dados positivos) *versus* a sua taxa de falsos positivos (razão entre dados incorretamente classificados como positivos e o total de dados positivos). A AUC, por sua vez, corresponde à área do gráfico abaixo da curva ROC, e pode variar de 0,5 a 1, sendo que valores mais próximos a 0,5 sugerem falha do modelo e

valores mais próximos a 1 indicam uma boa predição (ANBALAGAN *et al.*, 2015; BHANDARI, 2020).

Os graus de suscetibilidade a deslizamentos dados pelo operador *fuzzy gamma* são valores entre 0 e 1. Para elaboração da curva ROC e da AUC, esses valores foram divididos em dez classes através do método de quebras naturais (*Jenks*), disponível no ArcGIS Pro.

5.2.13. Elaboração dos Mapas de Suscetibilidade a Deslizamentos

Após a validação, as dez classes utilizadas para o cálculo da AUC foram agrupadas em duplas, resultando em mapas definitivos com cinco classes de suscetibilidade a deslizamentos: Muito baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta.

6. RESULTADOS

6.1. INVENTÁRIO DE DESLIZAMENTOS

6.1.1. Deslizamentos Identificados Remotamente

A partir da análise de ortofotos, modelos digitais de superfície e imagens de satélite, foi possível identificar um total de 83 cicatrizes de movimentos de massa. Os deslizamentos identificados desta forma são predominantemente escorregamentos, tendo a maioria destes ocorrido em áreas de vegetação nativa densa.

Dos 83 deslizamentos, 46 foram identificados a partir das ortofotos da SDS-SC (datadas de 2010), 26 a partir das imagens do CBERS-4A de setembro de 2020 e apenas 11 a partir das imagens do CBERS-4A de abril de 2021.

Observou-se que, em muitos casos, movimentos de massa identificados primeiramente nas imagens de 2010 puderam ser constatados também nas imagens de 2020 e 2021, evidenciando uma possível reincidência desses processos nos mesmos locais.

Grande parte desses movimentos de massa se encontra em áreas de difícil acesso. No entanto, três puderam ser constatados durante o trajeto do trabalho de campo. O escorregamento de maior extensão ocorre na região noroeste do município, próximo ao limite com o município de Rodeio, sobre gnaisses do CGSC. Esse deslizamento também fora descrito anteriormente por Coutinho (2016), tendo ocorrido primeiramente em 2008 e novamente, no mesmo local, em 2011, quando desenvolveu maiores proporções e provocou uma vítima fatal, além de enormes prejuízos sobre estradas e benfeitorias (Figura 27). A movimentação de solo e matacões teria bloqueado e modificado o curso de um rio na Microbacia do Ribeirão São Paulo, que foi rearranjado posteriormente em seu curso original pelos moradores, com a ajuda de máquinas. Essas informações foram relatadas, durante o trabalho de campo, pelo Sr. Neivo Oliveira, morador da localidade de Ribeirão Oitenta, que também alertou para a presença de novas trincas do solo na região da coroa do antigo escorregamento, evidenciando que as condições de instabilidade no local ainda não cessaram. Atualmente, a área de cicatriz deixada pelo deslizamento (cerca de 8,55 ha) é ocupada para silvicultura.

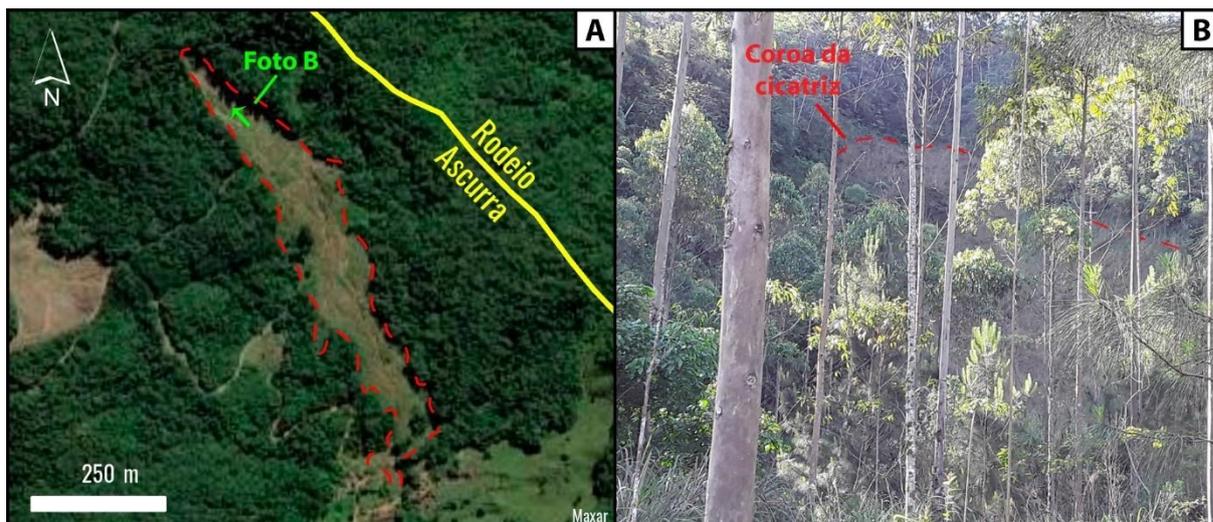


Figura 27 – Escorregamento de grandes proporções ocorrido em Ascurra no ano de 2011, na localidade de Ribeirão Oitenta, próximo ao limite municipal com Rodeio. A) Traçado da cicatriz do escorregamento sobre imagens de satélite Maxar. Da coroa ao frente, a cicatriz possui cerca de 870 m de comprimento. Devido à grande extensão da cicatriz e com base nos relatos dos moradores da localidade, acredita-se que o movimento tenha se iniciado como um escorregamento e evoluído para uma corrida de massa. B) Ao fundo, em meio às árvores, é possível observar a escarpa do escorregamento. Foto de 2021. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2. Deslizamentos Identificados em Campo

Onze cicatrizes de movimentos de massa, localizadas principalmente em taludes adjacentes a estradas e em áreas de pecuária, foram identificadas ao longo do trabalho de campo (Figura 28). Destes, três haviam se desenvolvido sobre rochas gnáissicas do CGSC, enquanto os demais ocorreram em rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Itajaí.



Figura 28 – Mapa de localização dos 11 deslizamentos identificados durante o trabalho de campo. Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso do deslizamento de número DSL-07 (Figura 29), ocorrido sobre os gnaisses do CGSC, na região sudoeste do município, foi possível constatar a concordância da superfície de ruptura com a atitude da foliação das rochas (N10W/64 NE).

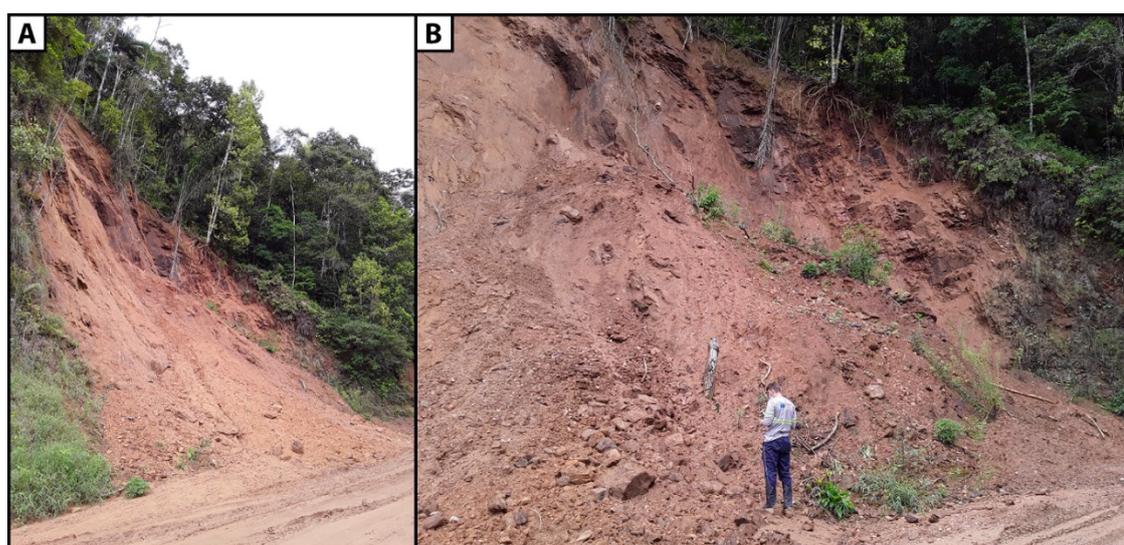


Figura 29 – Escorregamento recente na região sudoeste de Ascurra, próximo à localidade de Guaricanas II, às margens da estrada para Ibirama, no ponto DSL-07. A) Vista geral da cicatriz do escorregamento. B) Vista mais aproximada da cicatriz, com escala. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os deslizamentos ocorridos sobre as rochas da Bacia do Itajaí, na maioria dos casos, não foi possível estabelecer uma relação clara entre a atitude das camadas sedimentares e o desenvolvimento dos planos de ruptura. As situações observadas em campo (Figura 30) sugerem um controle muito maior da ação antrópica sobre a ocorrência desses movimentos de massa, visto que se desenvolveram principalmente em cortes de estrada íngremes e pastagens onde a vegetação predominante é gramínea.

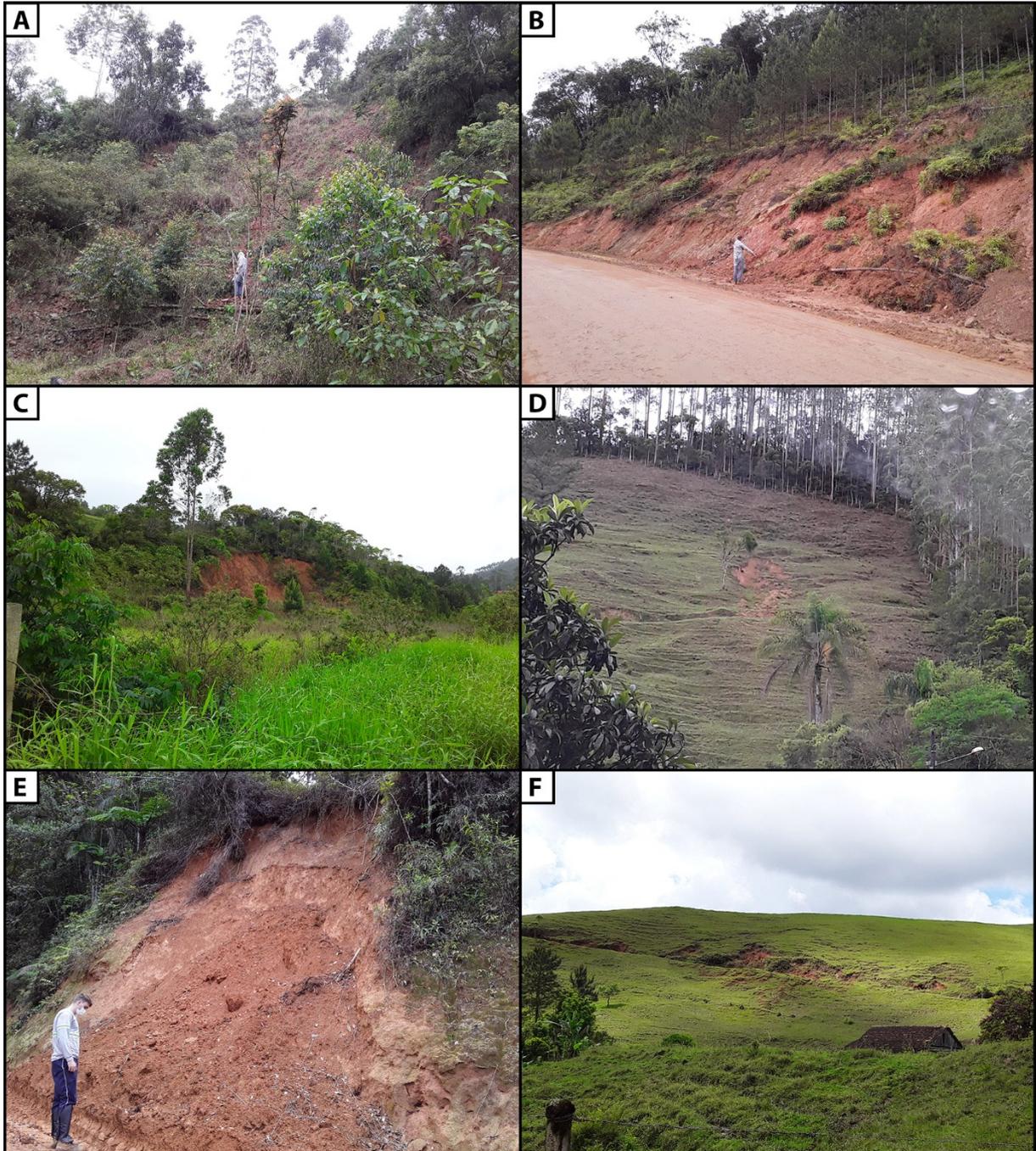


Figura 30 – Deslizamentos identificados durante o trabalho de campo. A) Escorregamento desenvolvido sobre rochas hipabissais ácidas, próximo ao topo de um morro na região leste do município (ponto DSL-01). B e C)

Escorregamentos planares ocorridos em cortes de estrada próximo ao Rio Itajaí-Açu, limite norte do município (DSL-02 e 03). D) Escorregamento ocorrido em pastagem próximo ao Ribeirão Santa Bárbara, região sudeste de Acurra (DSL-06). E) Escorregamento planar desenvolvido à beira da estrada para Ibirama, sobre rochas gnáissicas do CGSC, na porção sudoeste do município (DSL-08). F) Rastejos evoluindo para escorregamentos às margens de uma estrada agrícola em meio a pastagens, na localidade de Guaricanas II, sudoeste da área de estudo (DSL-09). Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.3. Deslizamentos Obtidos de Outros Trabalhos

A localização de dois escorregamentos foi obtida do trabalho de Hoelzel e Bellettini (2015). Ambos os deslizamentos em questão ocorreram em áreas declivosas de ocupação urbana no bairro Estação.

6.1.4. Conformação Final do Inventário de Deslizamentos

Ao todo, entre movimentos de massa identificados remotamente, extraídos de trabalhos anteriores e constatados em campo, o inventário final de deslizamentos conta com 96 ocorrências (Figura 31).

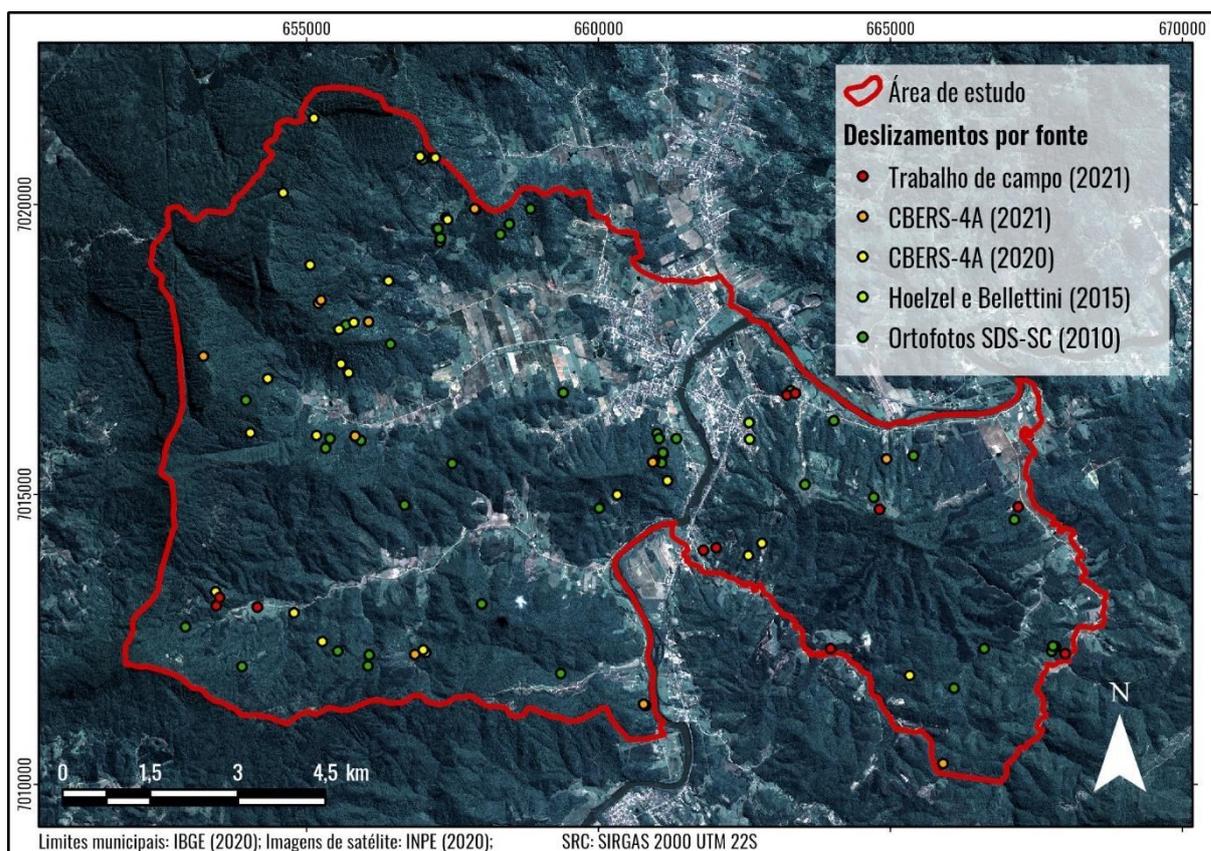


Figura 31 – Inventário de deslizamentos para o município de Acurra, com 96 pontos registrados. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.5. Pontos de Treinamento e Validação

Os pontos do inventário de deslizamentos foram divididos em dois conjuntos para análise de suscetibilidade, sendo 75% (72 deslizamentos) destinados ao cálculo das relações de frequência e graus de pertinência (treinamento) e 25% (24 deslizamentos) destinados à validação dos resultados. A divisão dos dados pode ser observada no mapa a seguir (Figura 32).

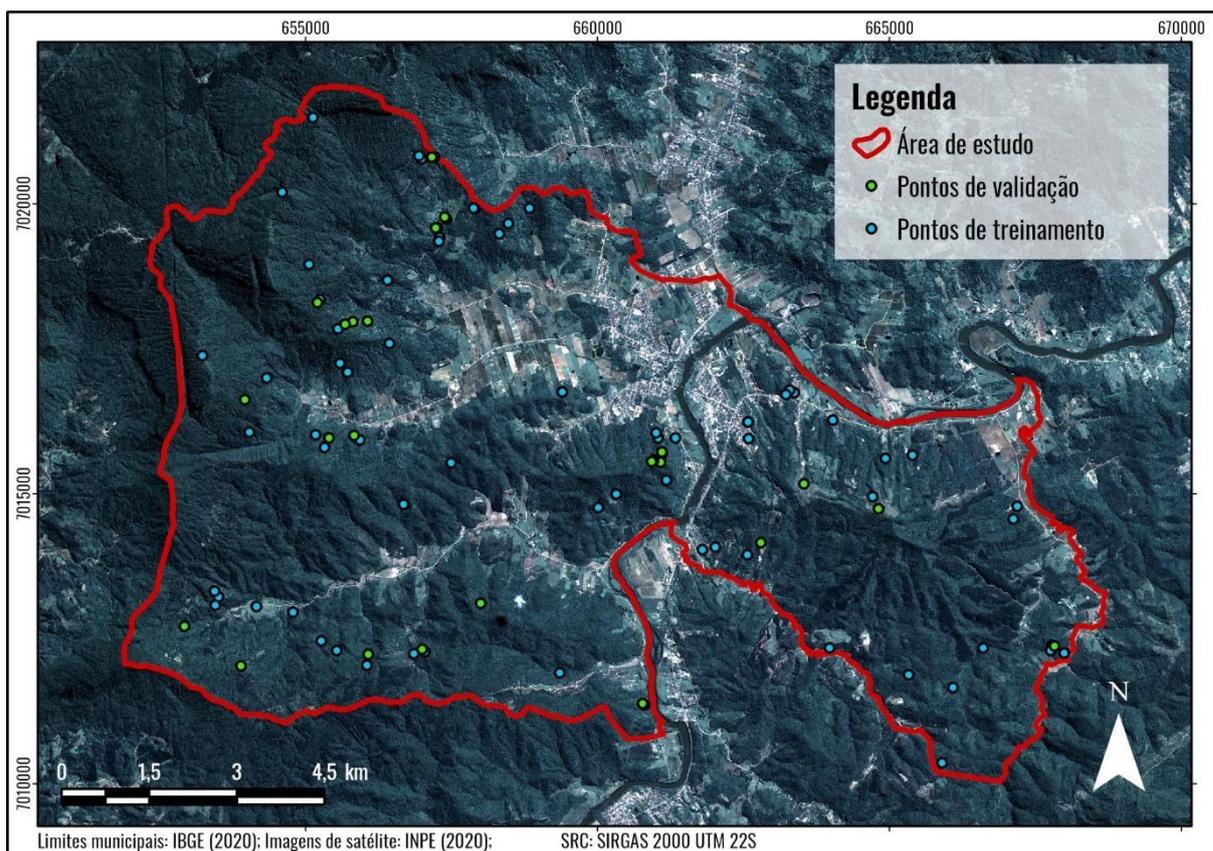


Figura 32 – Separação do inventário de deslizamentos em pontos de treinamento (75% = 72 pontos) e pontos de validação (25% = 24 pontos). Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2. INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICAS EM CAMPO

O mapa a seguir (Figura 33) mostra a localização dos 15 afloramentos na área de estudo onde foram realizadas investigações litoestruturais durante o trabalho de campo, assim como as principais litologias identificadas, separadas em grupos simplificados.

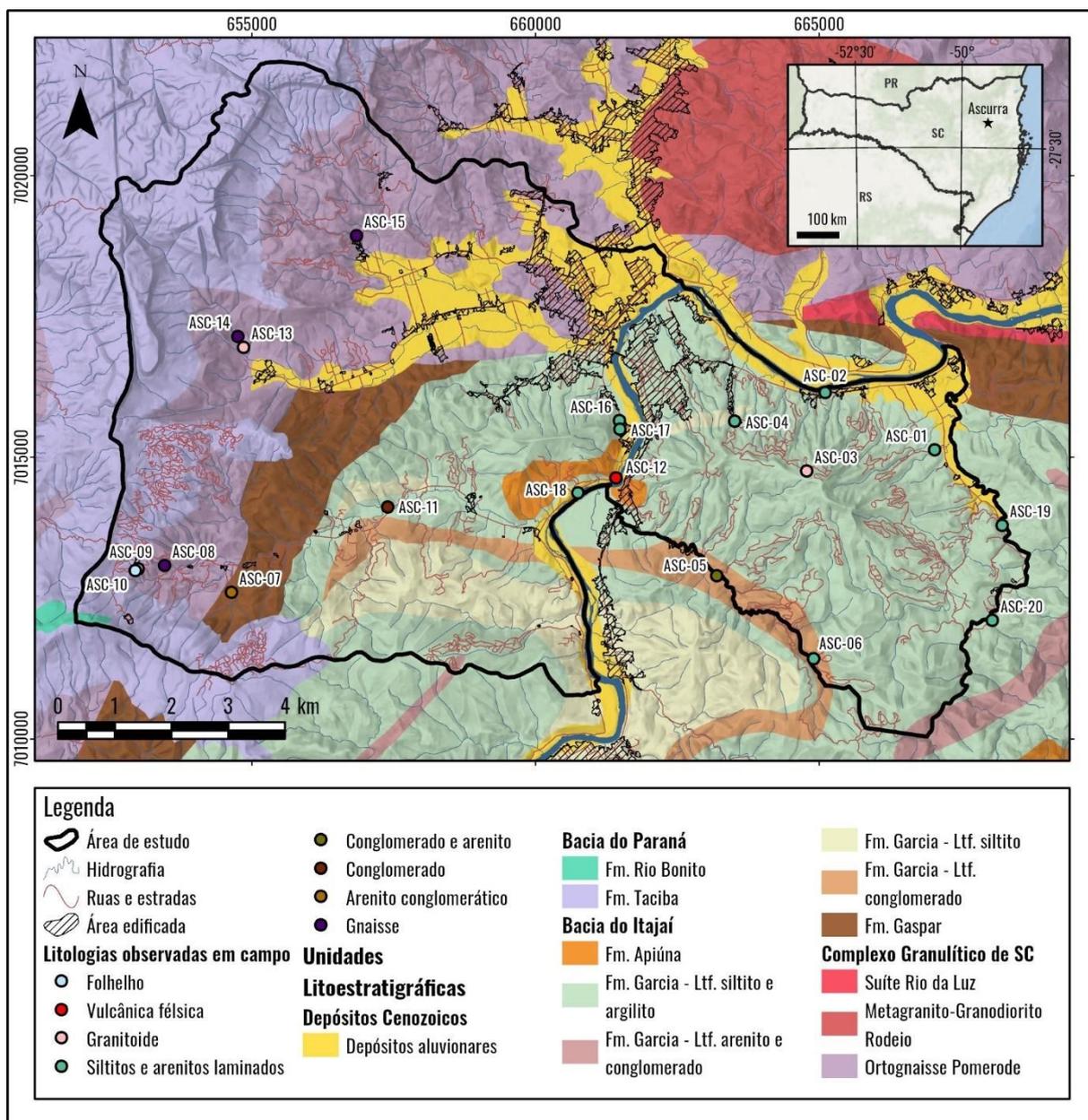


Figura 33 – Mapa dos afloramentos visitados em campo para reconhecimento lito-estrutural da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.1. Gnaisses do Complexo Granulítico de Santa Catarina

Os gnaisses ocorrem nas regiões sudoeste a noroeste da área de estudo. Tratam-se de gnaisses bandados, de coloração acinzentada, mesocráticos e de granulometria média. As bandas félsicas são constituídas principalmente por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino, enquanto as bandas máficas contêm biotita e anfibólios, e a alternância entre essas duas bandas, de espessura milimétrica a centimétrica, é bem definida.

Na porção sudoeste do município, o bandamento dos gnaisses apresenta atitude N10°W/65° NE, enquanto na porção oeste apresenta-se orientado na direção S60°W (não foi

possível medir ângulo e sentido de mergulho). Em alguns pontos, os gnaisses encontram-se intrudidos por veios pegmatíticos hololeucocráticos contendo cristais centimétricos de quartzo e feldspato potássico rosado.

6.2.2. Arenitos da Formação Gaspar

Os arenitos encontrados na região sudoeste da área de estudo correspondem a arenitos conglomeráticos de coloração cinza, com matriz grossa, mal selecionados, contendo abundância de clastos angulosos de feldspato potássico. Tais arenitos estão dispostos em camadas tabulares métricas alternando entre estratificação plano-paralela e cruzada acanalada.

O acamadamento desses arenitos, no ponto ASC-07 (Figura 34), tem atitude $N35^{\circ}E/22^{\circ}SE$ e é intersectado por um plano de descontinuidade de atitude $N44^{\circ}W/64^{\circ}SW$.

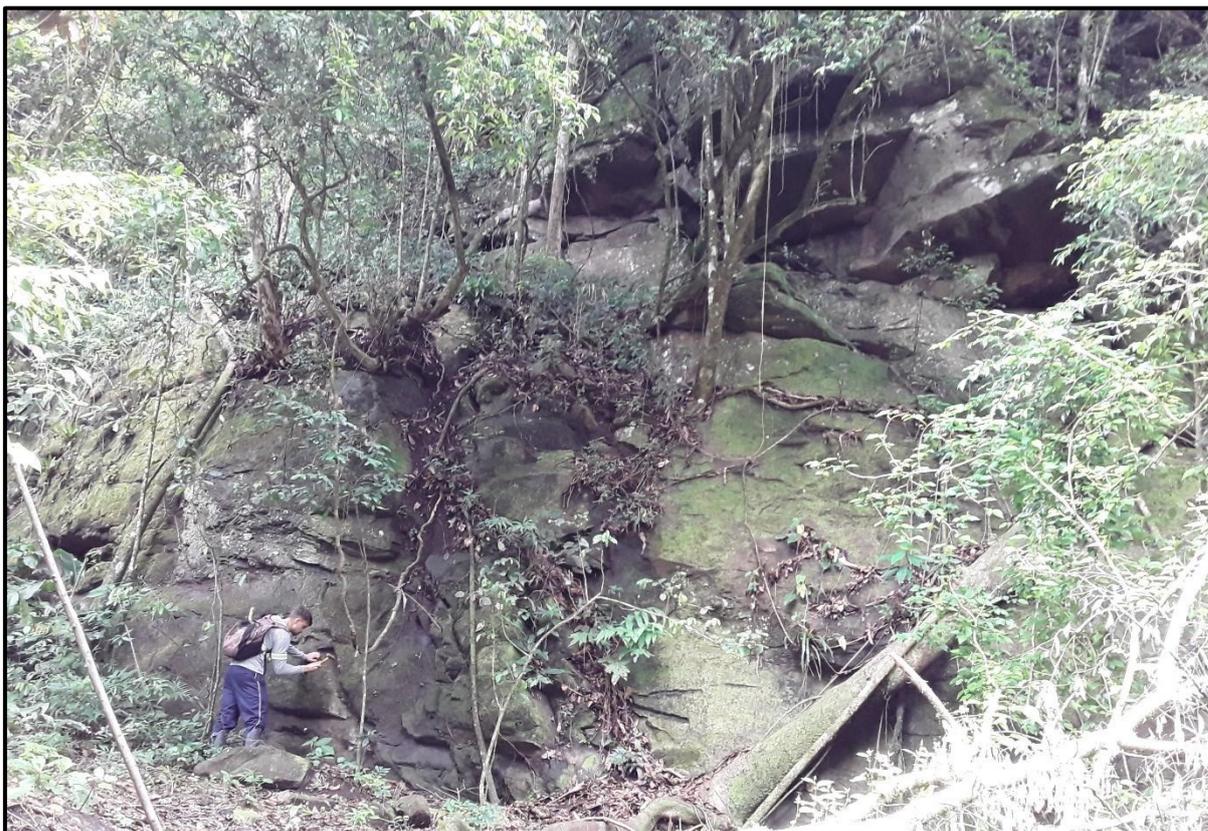


Figura 34 – Afloramento de arenito conglomerático no ponto ASC-07, região sudoeste de Ascurra, localidade de Guaricanas II. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.3. Arenitos e Conglomerados da Formação Garcia

As rochas sedimentares de granulometria grossa da Formação Garcia consistem em conglomerados polimíticos clasto-suportados com granocrescência ascendente e presença de lentes de pelitos maciços cinzentos, sobrepostos por arenitos quartzo-feldspáticos de

granulometria grossa, imaturos, maciços a estratificados, contendo níveis decimétricos de conglomerado.

Essas litologias são encontradas *in situ* na região sul da área de estudo, ao longo do Rio Santa Bárbara (Figura 35), e também na forma de enormes matacões rolados de conglomerado no vale da localidade de Guaricanas II, na porção sudoeste de Ascurra.



Figura 35 – Afloramento de arenitos e conglomerados da Formação Garcia, no ponto ASC-05, próximo ao limite municipal entre Ascurra e Apiúna, localidade de Santa Bárbara. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.4. Siltitos e Arenitos Laminados da Formação Garcia

Rochas sedimentares de granulometria fina com laminação plano-paralela foram encontradas em boa parte da região central e leste da área de estudo (Figura 36). Representam intercalações entre lâminas de siltitos e arenitos muito finos, com coloração bege clara, podendo variar para bege alaranjada, bege escuro, esverdeada, prateada, azulada e cinza, dependendo do local. Por vezes, apresentam lentes de arenito fino. Em alguns pontos, principalmente na região central e leste de Ascurra (localidade de Ilse Grande), é também possível nessas rochas encontrar cristais milimétricos de micas prateadas, orientados segundo a laminação.

Em geral, os siltitos e arenitos muito finos na área de estudo são as litologias onde se observa melhor o registro de falhas, fraturas e dobras, sendo comum a presença de planos de falha associados às antiformas de mesodobras planas, suaves a fechadas.

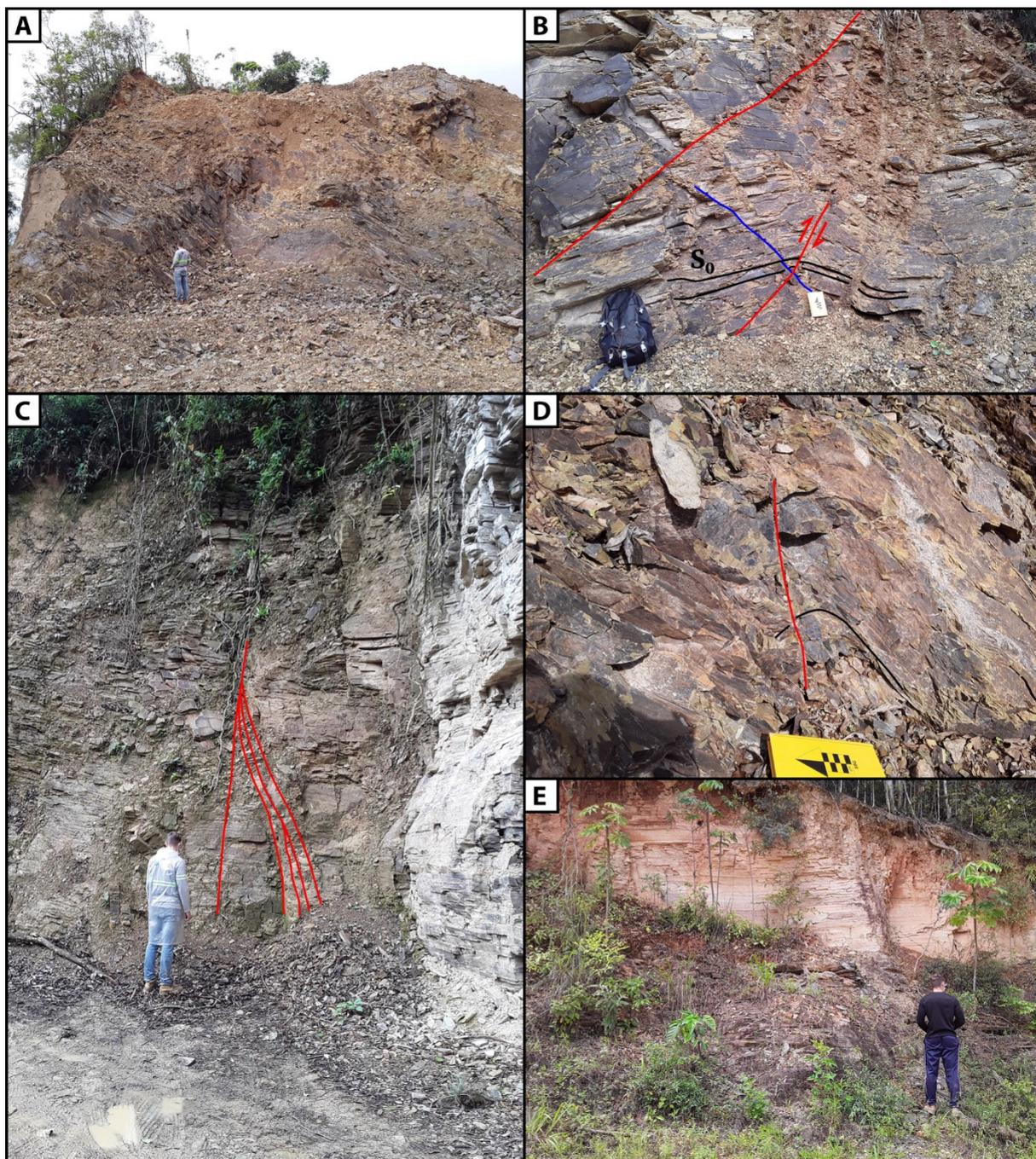


Figura 36 – Afloramentos de siltitos e arenitos laminados visitados em campo. A) Afloramento em pedreira no ponto ASC-02. B) Afloramento em corte de estrada no ponto ASC-04, com indicação da relação entre acamadamento (preto), falhas (vermelho) e fraturas (azul). C) Afloramento em corte de estrada no ponto ASC-06, com indicação de uma estrutura observada no local. D) Plano de falha (vermelho) em dobra no ponto ASC-16. E) Afloramento no ponto ASC-20. Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessas rochas, as direções de falhas e fraturas mais comuns são WNW e NE, sendo possível observar certa continuidade de direções entre alguns afloramentos visitados, embora os ângulos e sentidos de mergulho variem bastante. As atitudes das camadas sedimentares (S_0) também exibem grande variação, conforme pode ser visualizado no mapa a seguir (Figura 37).

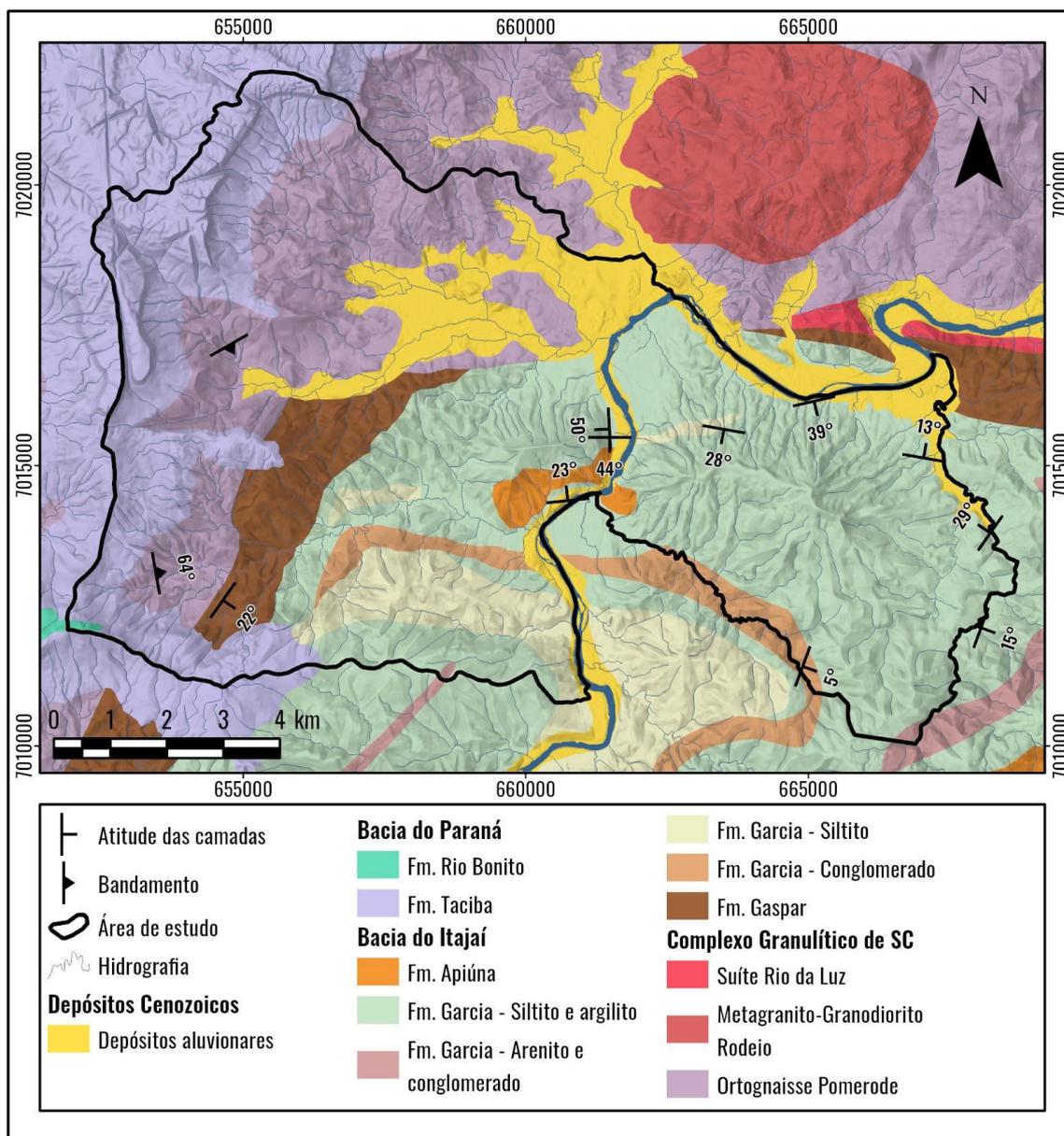


Figura 37 – Atitudes das camadas sedimentares e bandamentos gnáissicos na área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.5. Granitoides

Rochas plutônicas félsicas foram identificadas na região sudoeste da área de estudo, no ponto ASC-09, na forma de um granitoide de coloração hololeucocrática, com textura fanerítica média-grossa inequigranular e isotrópico, composto principalmente por cristais centimétricos de feldspato potássico e por quartzo.

Já no ponto ASC-03, localizado no topo de um morro alongado na porção leste da área de estudo, foi observada uma rocha ígnea félsica de coloração hololeucocrática e textura fanerítica fina e isotrópica, muito alterada, exposta em uma cicatriz de escorregamento.

Uma outra ocorrência de granitoides foi registrada no ponto ASC-13. O granitoide em questão apresentava coloração mesocrática e textura fanerítica grossa, contendo feldspato alcalino e biotita em sua composição, além de quartzo em menores proporções.

6.2.6. Vulcânicas Félsicas da Formação Apiúna

Na região central de Ascurra, ponto ASC-12, foram encontradas rochas vulcânicas félsicas de coloração bordô, pertencentes à Formação Apiúna, com granulação variando de afanítica a porfírica, e compostas por fenocristais de feldspato alcalino, quartzo e minerais máficos dispersos em uma matriz afanítica (Figura 38). A rocha em questão apresentava microfraturamento, dando a ela um aspecto de mosaico.

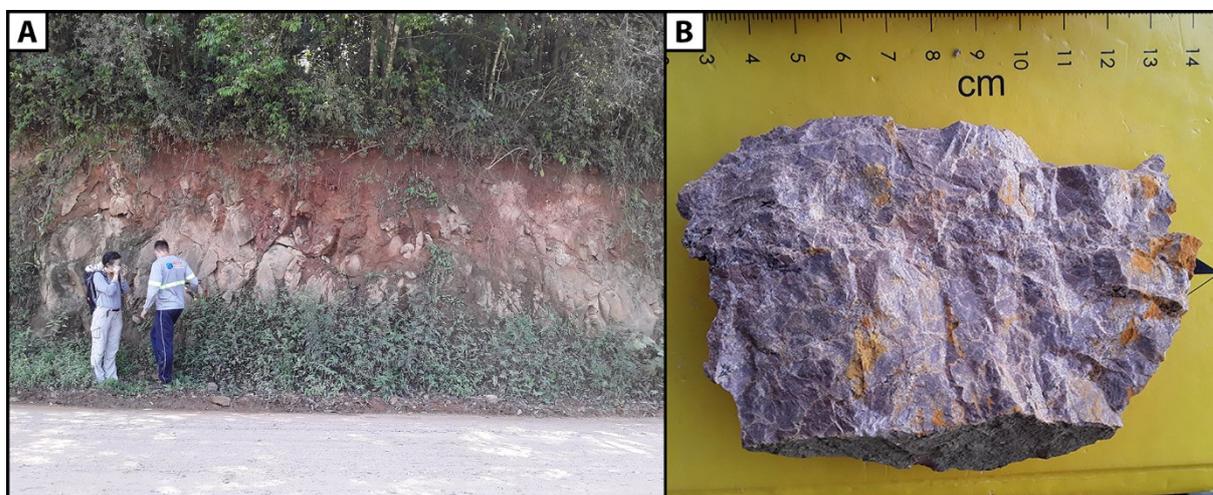


Figura 38 – Rochas vulcânicas félsicas encontradas na região central de Ascurra, ponto ASC-12. A) Visão geral do afloramento. B) Amostra de mão recolhida no afloramento. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.7. Folhelhos da Bacia do Paraná

Na região sudoeste da área de estudo ocorrem folhelhos de coloração cinza esverdeada, com camadas lenticulares de siltito bege-alaranjado (Figura 39). Essas rochas encontravam-se intensamente perturbadas/onduladas por planos de falha ou fratura, de atitude $S05^{\circ}W/85^{\circ}NW$, $N45^{\circ}W/86^{\circ}SW$ e $N66^{\circ}E/90^{\circ}$.



Figura 39 – Lente de siltito em meio a folhelhos da Fm. Taciba, Bacia do Paraná, no ponto ASC-10. Fonte: Autor.

6.2.8. Falhas e fraturas

As atitudes de planos de descontinuidade (falhas e fraturas) foram medidas ao longo do trabalho de campo com o auxílio de uma bússola Brunton. Essas medições foram realizadas com o intuito de apoiar o traçado de falhas identificadas através de fotointerpretação do modelo digital de terreno.

Em sua totalidade, as estruturas planares encontradas em campo possuíam caráter rúptil, e não foram encontrados, na maioria dos casos, indicadores cinemáticos suficientes para afirmar a respeito de seu sentido de movimentação. As atitudes dos planos observados dessas estruturas planares são mostradas nos estereogramas do mapa da Figura 40, a seguir.

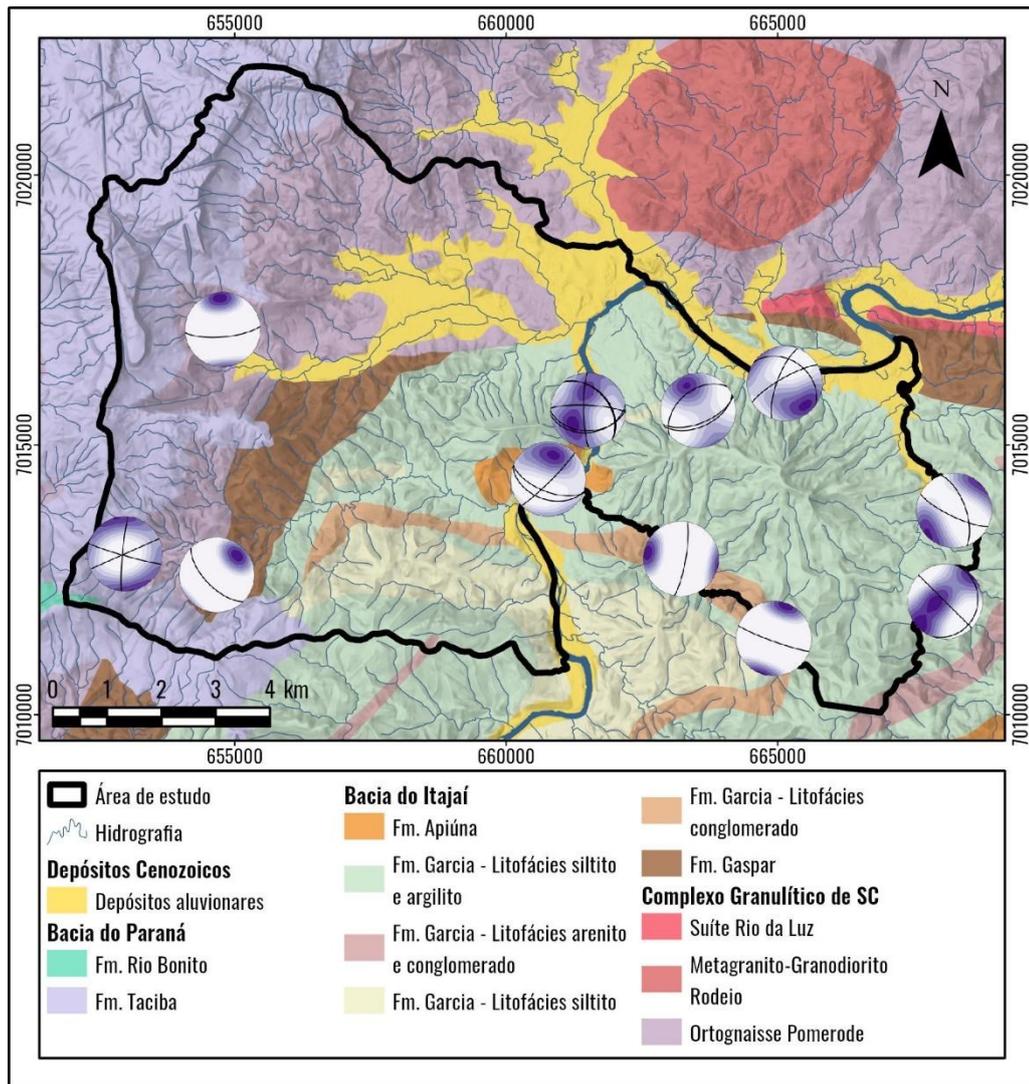
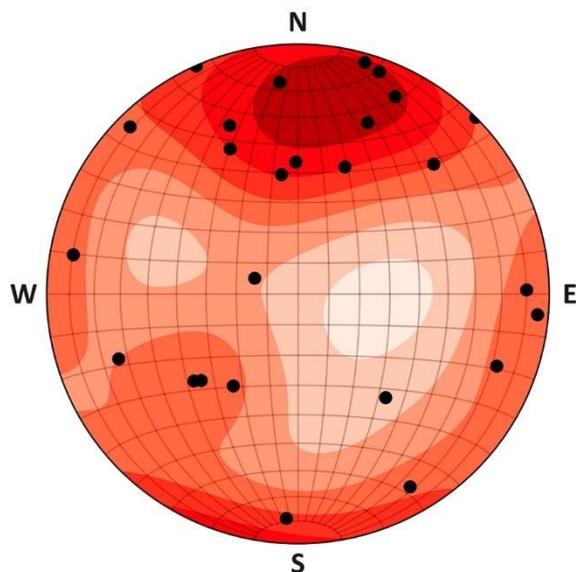


Figura 40 – Estereogramas com planos e densidade de polos de falhas e fraturas registradas durante o trabalho de campo. Para facilitar a visualização, as medidas dos pontos ASC-16 e ASC-17 foram plotadas em um único estereograma. Fonte: Elaborado pelo autor.

As principais direções observadas para os planos de falhas e fraturas correspondem às direções WNW e NW, sendo estas direções comuns em toda a área de estudo. Falhas de direção ENE foram observadas de forma relativamente contínua em pontos da região nordeste e sudoeste de Ascurra, porém com sentidos de mergulho variáveis, sendo predominantemente estruturas de alto ângulo.

Os diagramas abaixo (Figura 41) representam os polos e direções das estruturas visualizadas em campo, em sua totalidade.

Densidade de Polos de Falhas/Fraturas



Direção de Falhas/Fraturas

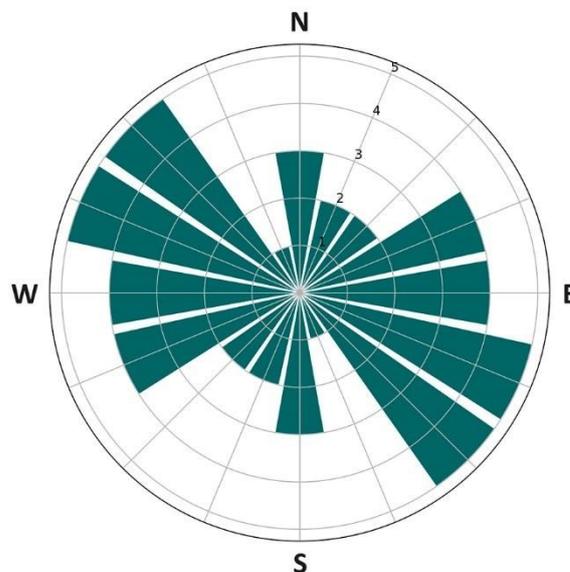


Figura 41 – Estereograma e diagrama de roseta representando as atitudes de planos de falha e fratura medidas durante o trabalho de campo. Os pontos no estereograma representam polos dos planos, e cores mais escuras representam uma maior densidade de polos. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3. GRAUS DE PERTINÊNCIA E ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES

6.3.1. Litologia

As classes de litologia foram extraídas diretamente das unidades litoestratigráficas presentes no mapa geológico de Santa Catarina, elaborado pela CPRM (2014), e, portanto, possuem a mesma distribuição espacial (Figura 42). Em grande parte, a litologia dessas unidades pôde ser conferida em campo, mas unidades posicionadas em locais de difícil acesso da área de estudo, principalmente aquelas pertencentes à Bacia do Paraná, não puderam ser visitadas no trabalho de campo em questão.

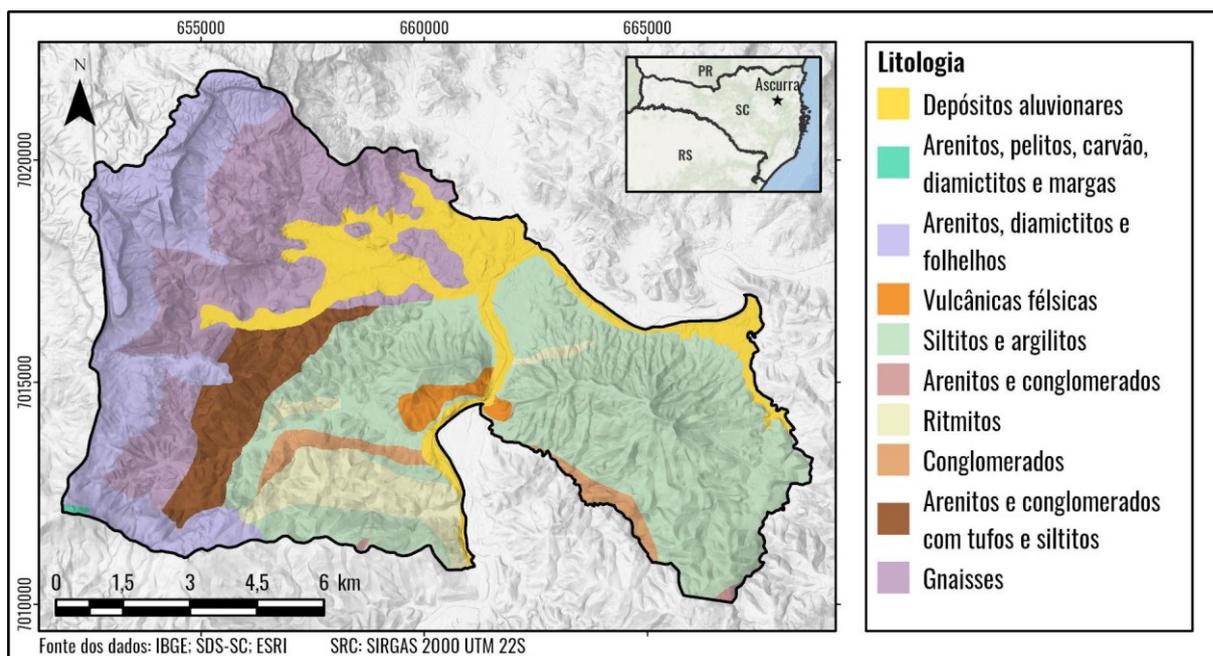


Figura 42 – Classes de litologia utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se o inventário de deslizamentos completo, os siltitos e argilitos da Bacia do Itajaí foram as litologias com maior ocorrência de movimentos de massa, com 40 deslizamentos registrados, seguidos pelos gnaisses do CGSC, com 32 deslizamentos.

As classes com maior grau de pertinência para a análise de suscetibilidade (calculada a partir dos pontos de treinamento) foram os gnaisses do CGSC, os siltitos e argilitos da Formação Garcia e as rochas vulcânicas félsicas da Formação Apiúna, nessa ordem (Tabela 4).

Tabela 4 – Graus de pertinência das classes de litologia.

Classe	Área (ha)	Deslizamentos (total)	Pontos de treinamento	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
Depósitos aluvionares	1280,67	1	1	0,122	0,020
Arenitos, siltitos, folhelhos, carvão, diamictitos e margas	10,46	0	0	0,000	0,000
Arenitos, diamictitos e folhelhos	1921,55	10	6	0,490	0,079
Vulcânicas félsicas	140,92	1	1	1,113	0,179
Siltitos e argilitos	4240,75	40	32	1,183	0,190
Arenitos e conglomerados	18,54	0	0	0,000	0,000
Ritmitos	622,89	7	3	0,755	0,121
Conglomerado	258,56	1	1	0,606	0,098
Arenitos e conglomerados com tufos e siltitos	652,40	4	3	0,721	0,116
Gnaisses	2141,66	32	13	1,830	0,294

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.2. Distância de Estruturas

A fotointerpretação de estruturas planares na área de estudo iniciou-se com o traçado de lineamentos sobre mapas de relevo sombreado em escala 1:25.000. Ao todo, foram identificados 3.165 lineamentos, conforme mostra o mapa a seguir (Figura 43).

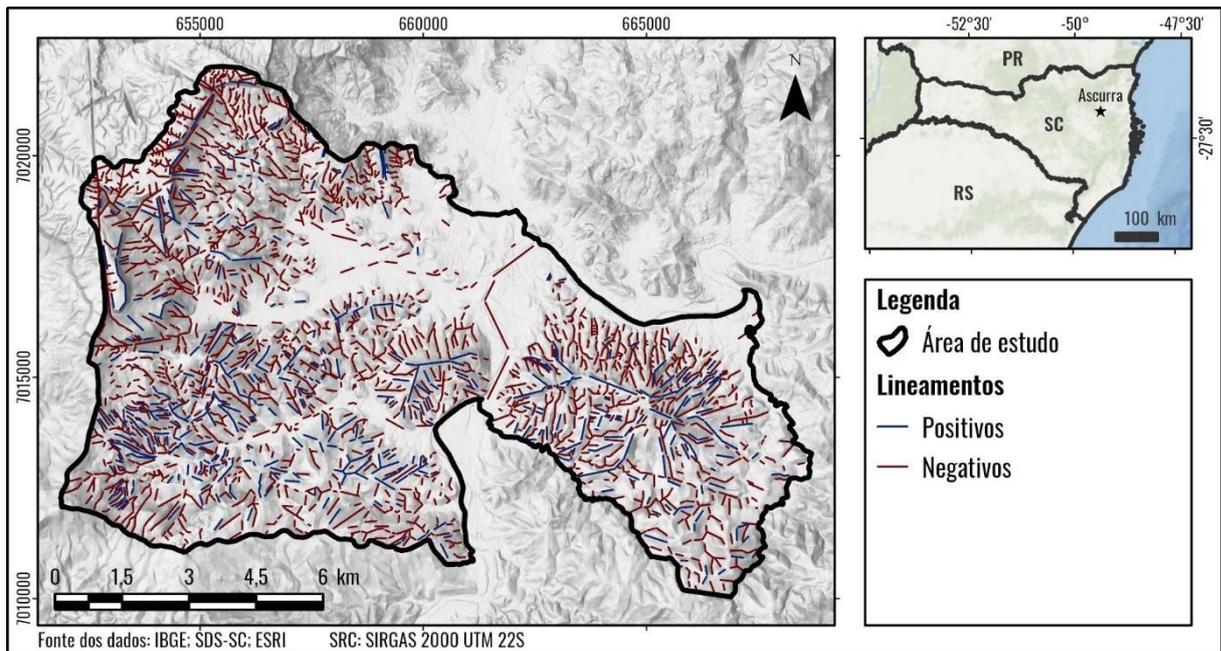


Figura 43 – Mapa de lineamentos traçados na área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

A principal direção identificada nos lineamentos mapeados foi WNW, considerando-se toda a área de estudo. A direção NNE também foi significativa, no caso dos lineamentos negativos, enquanto os lineamentos positivos, apesar de muito mais fortemente polarizados na direção WNW, manifestaram-se também de forma abundante na direção NE e ENE. Essa relação pode ser observada nos diagramas de roseta da Figura 44.



Figura 44 – Diagramas de roseta mostrando as principais direções dos lineamentos identificados na área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando separados por unidades geológicas, os lineamentos visualizados sobre o CGSC e Bacia do Itajaí possuem orientação preferencial WNW, sendo esta direção mais polarizada no CGSC em comparação com a Bacia do Itajaí. Por outro lado, os lineamentos observados na Bacia do Paraná têm orientação mais bem distribuída entre as direções NE a SE, com presença menos acentuada de direções próximas ao norte e sul (Figura 45).

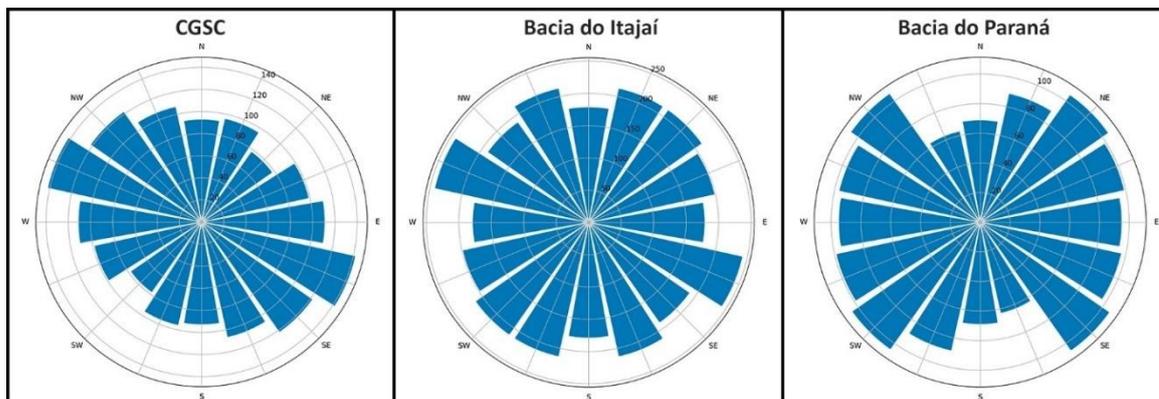


Figura 45 – Diagramas de roseta com as direções de lineamentos nas três grandes unidades geológicas presentes na área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

O traçado das estruturas planares, realizado a partir dos dados de campo e lineamentos, está disposto a seguir (Figura 46). Ao todo, foram identificados 65 segmentos de falhas/fraturas. As principais direções observadas para essas estruturas foram WNW e NNE, com presença menos significativa de estruturas de direção NNW e ENE.

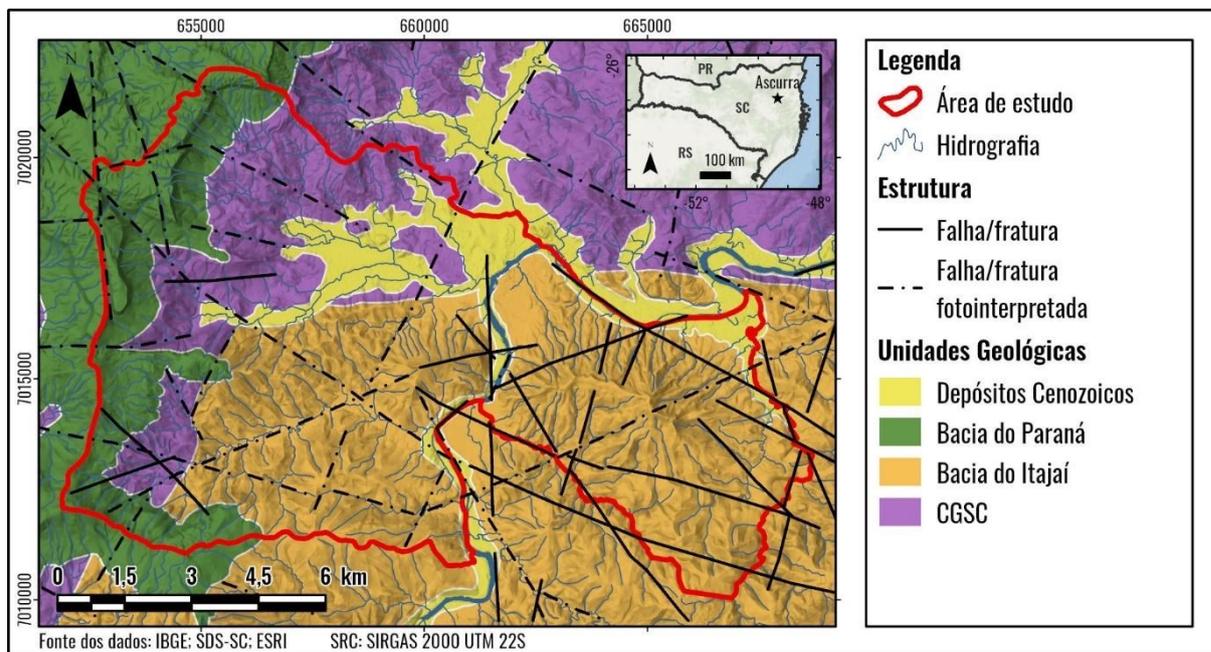


Figura 46 – Falhas e fraturas mapeadas e fotointerpretadas na região da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

As classes de distância de estruturas foram elaboradas a partir de intervalos de 100 m até 500 m de distância dos traçados e uma única classe a partir de 500 m (Figura 47).

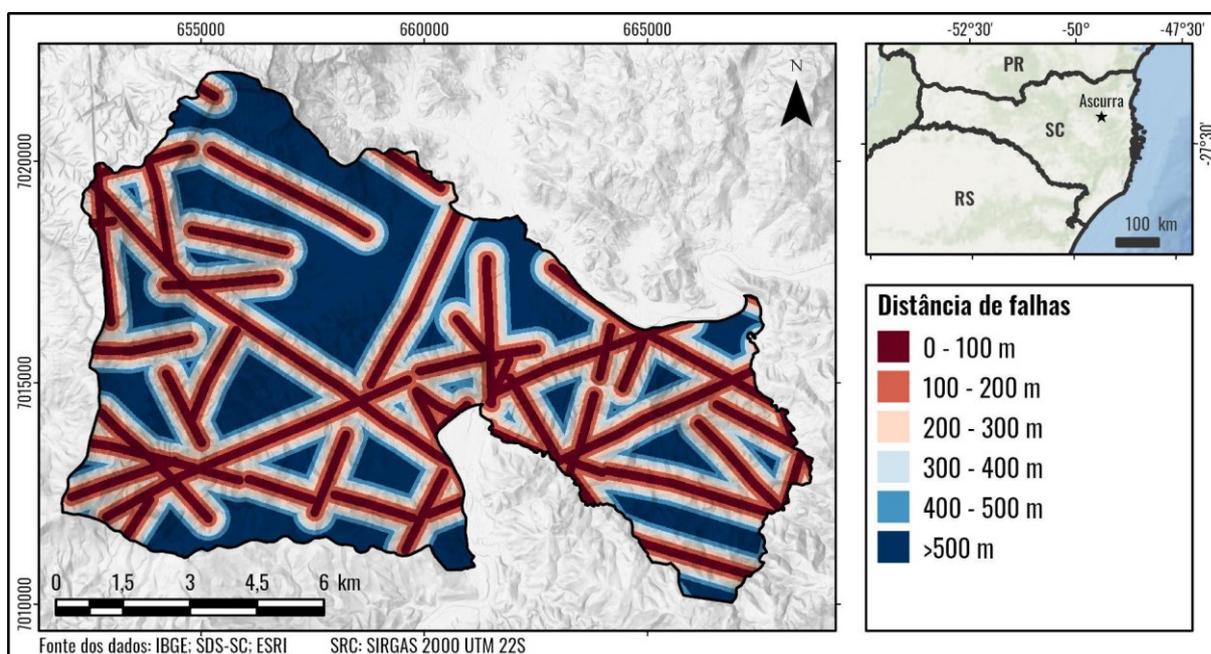


Figura 47 – Classes de distância de estruturas utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se o inventário completo de deslizamentos, distâncias de 0-100 m de falhas apresentaram a maior quantidade de deslizamentos, com 31 ocorrências registradas, enquanto distâncias de 400-500 m e mais de 500 m apresentaram apenas 7 deslizamentos cada, sendo estas as menores contagens no fator.

A classe de 300-400 m de distância obteve o maior grau de pertinência nesse fator condicionante (0,177), seguida pela classe de 0-100 m (0,174), enquanto o menor grau foi calculado para a distância de 400-500 m (0,131), conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Graus de pertinência das classes de distância de falhas.

Classe	Área (ha)	Deslizamentos (total)	Pontos de treinamento	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
0-100 m	2176,93	31	15	1,080	0,174
100-200 m	1980,20	19	12	0,950	0,153
200-300 m	1747,19	22	12	1,077	0,173
300-400 m	1422,40	10	10	1,102	0,177
400-500 m	1158,69	7	6	0,812	0,131
>500 m	2802,98	7	17	0,951	0,153

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.3. Altitude

As altitudes na área de estudo variam entre 66 e 1003 metros, estando os pontos mais baixos localizados ao longo da calha do Rio Itajaí-Açu e os pontos mais altos no topo das escarpas da Serra Geral, na região noroeste do município, sobre as rochas sedimentares da Formação Taciba.

Em termos de altitude e formas geomorfológicas gerais do terreno, é possível observar 4 domínios distintos na região: a) áreas relativamente planas, em baixas altitudes, que correspondem em área principalmente aos depósitos quaternários e são utilizadas primariamente para ocupação urbana e agricultura; b) áreas de morros, em altitudes entre 100-150 e 750 m, com declividades na faixa dos 15-50°, onde predomina a vegetação nativa e atividades de silvicultura; c) áreas de escarpas e cânions com forte controle estrutural, em altitudes de 750-900 m, com declividades geralmente acima de 50°; e d) planaltos, também com forte controle estrutural da drenagem, em altitudes acima de 900 m.

Para definição das classes, as altitudes foram divididas em intervalos discretos de 150 metros, resultando em sete classes distintas para o fator altitude (Figura 48). Destas, a classe de 750-900 m de altitude foi a que obteve o maior grau de pertinência (0,316), enquanto as classes de 600-750 m e 900-1050 m obtiveram o menor grau (Tabela 6).

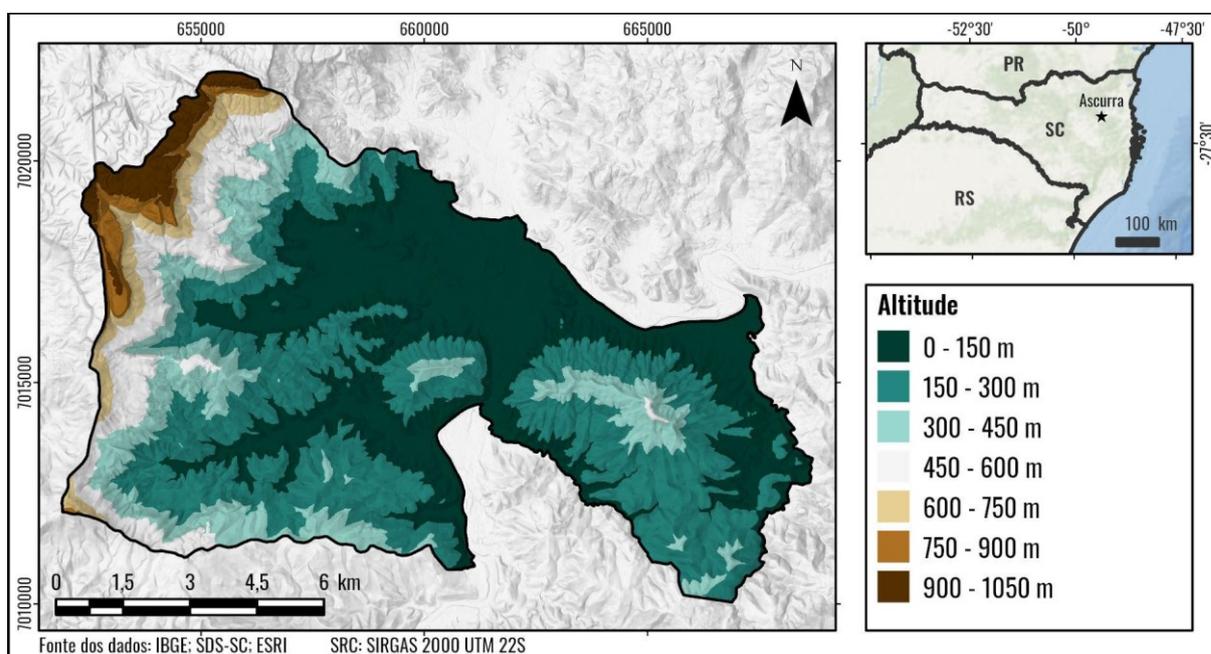


Figura 48 – Classes de altitude utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se o inventário completo de movimentos de massa, altitudes abaixo de 450 m concentram mais de 90% das ocorrências de deslizamentos, sendo o intervalo de 150-300 m aquele com o maior número de pontos registrados (48).

Os graus de pertinência também demonstram uma maior concentração de movimentos de massa em altitudes relativamente menores, sendo que, em áreas mais altas da área de estudo, apenas a faixa de altitudes correspondente às escarpas da Serra Geral exibe maior influência na suscetibilidade a tais processos.

Tabela 6 – Graus de pertinência das classes de altitude.

Classe	Área (ha)	Deslizamentos (total)	Pontos de treinamento	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
0-150 m	3974,16	18	18	0,710	0,114
150-300 m	3842,82	48	35	1,428	0,230
300-450 m	1624,09	21	12	1,158	0,186
450-600 m	924,11	6	4	0,679	0,109
600-750 m	382,13	0	0	0,000	0,000
750-900 m	239,64	3	3	1,963	0,316
900-1050 m	301,46	0	0	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.4. Declividade

A declividade do terreno na área de estudo chega até cerca de 77° nas áreas mais íngremes das escarpas da Serra Geral, na porção noroeste do município. Apesar disso, declividades na faixa dos 0-30° são as mais comuns em Ascurra, ocupando aproximadamente 87% da área do município.

As declividades foram divididas em intervalos discretos de 10° para a análise de suscetibilidade a deslizamentos, formando um arranjo de oito classes (Figura 49). A classe de 50-60° obteve o maior grau de pertinência, não apenas no fator declividade, mas dentre todas as classes de fatores condicionantes. Nas demais classes, o grau de pertinência diminui em patamares com a diminuição da declividade. As classes de 60-70° e 70-80°, porém, obtiveram grau de pertinência zero, devido à ausência de movimentos de massa mapeados nessas áreas (Tabela 7).

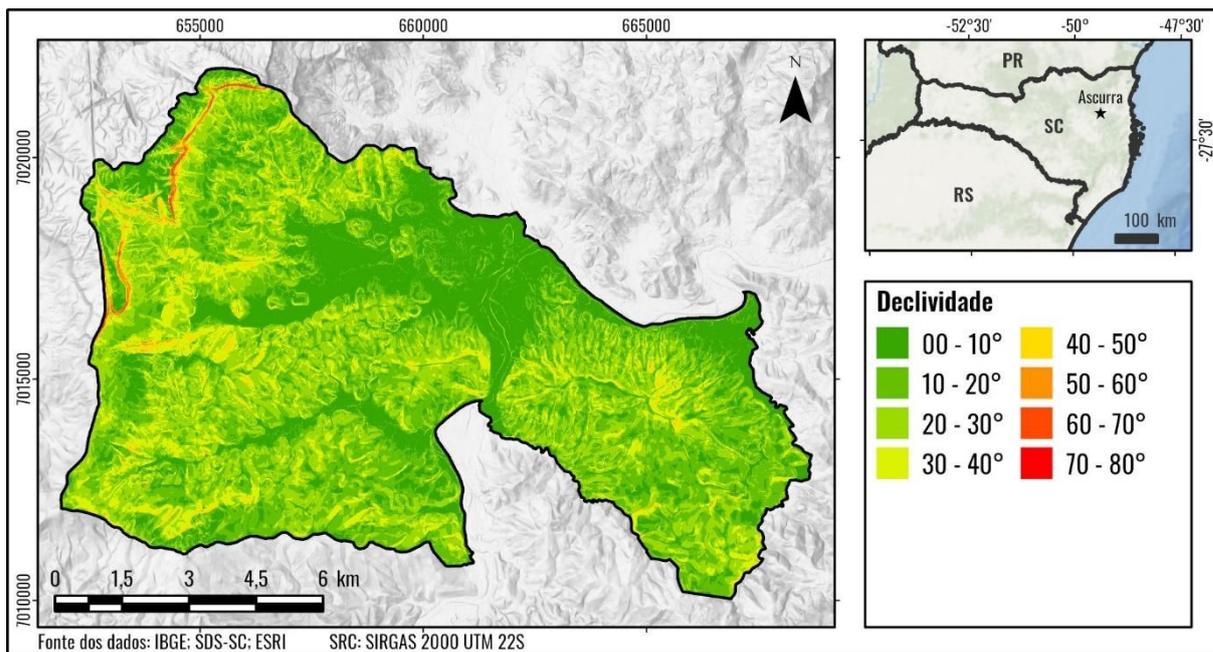


Figura 49 – Classes de declividade utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se todos os 96 pontos do inventário de deslizamentos, as declividades entre 10 e 40° compreendem 81,2% dos deslizamentos mapeados, enquanto declividades maiores que 60° não possuem movimentos de massa registrados.

Para declividades de até 60°, as classes de declividade e seus graus de pertinência apresentam um coeficiente de correlação de Person igual a 0,91, demonstrando que o aumento da declividade gera um aumento correspondente no grau de pertinência e, conseqüentemente, na suscetibilidade do terreno a movimentos de massa. Essa forte correlação torna a declividade o fator de maior importância para a análise.

Tabela 7 – Graus de pertinência das classes de declividade.

Classe	Área (ha)	Deslizamentos (total)	Pontos de treinamento	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
0-10°	2735,70	8	7	0,401	0,065
10-20°	3521,53	22	15	0,668	0,107
20-30°	3514,98	33	26	1,160	0,187
30-40°	1233,46	23	18	2,288	0,368
40-50°	214,40	7	4	2,925	0,470
50-60°	50,47	3	2	6,217	1,000
60-70°	17,37	0	0	0,000	0,000
70-80°	0,48	0	0	0,000	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.5. Orientação das Encostas

Foram definidas oito classes para o fator orientação das encostas, sendo elas baseadas nos pontos cardeais e colaterais (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste) (Figura 50).

Na área de estudo, a orientação mais comum para a face das vertentes, em termos de área, é a direção Leste, enquanto a direção Oeste ocupa a menor extensão. Essa tendência é concordante com a orientação das escarpas da Serra Geral, presentes na porção oeste do município, e também com as direções comuns de falhas observadas na região (NNE).

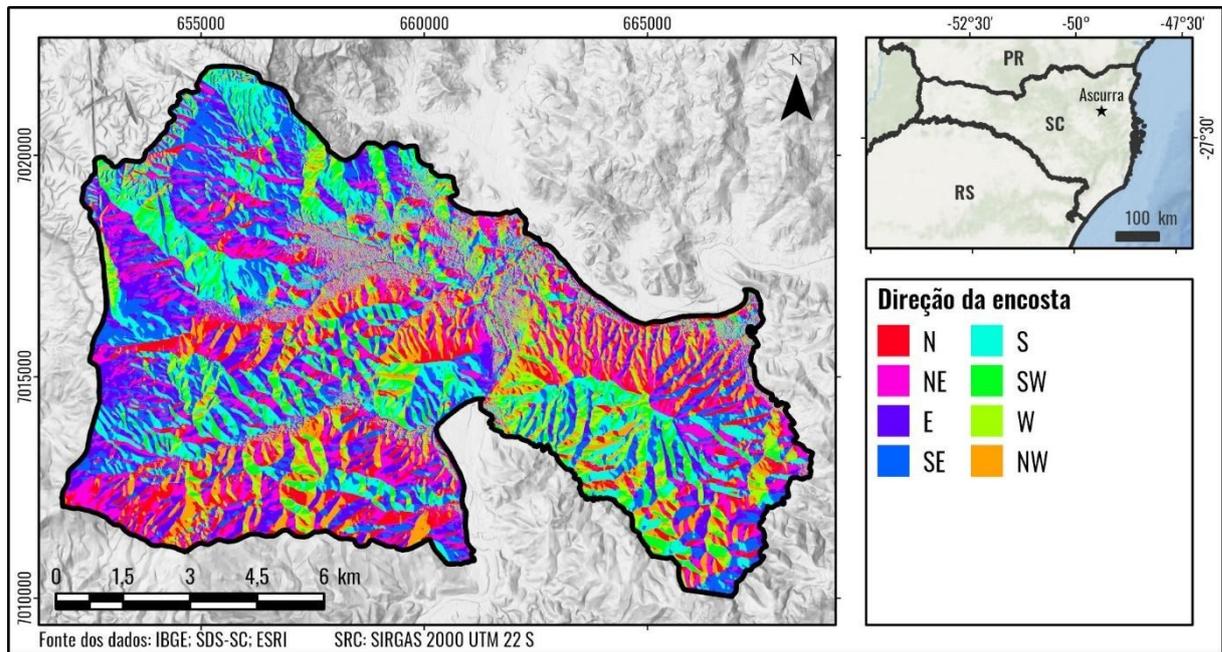


Figura 50 – Classes de orientação das encostas utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando-se todos os 96 pontos do inventário de deslizamentos, encostas voltadas para norte, nordeste e leste tiveram os maiores números de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, enquanto encostas voltadas para oeste, sudoeste e sul tiveram o menor número de registros.

O cálculo dos graus de pertinência revelou que encostas voltadas para o norte possuem a maior correlação com a ocorrência de deslizamentos, com grau de pertinência 0,232, seguidas pelas encostas voltadas para nordeste, com grau de pertinência 0,198 (Tabela 8).

A relação entre as direções das faces das encostas, o número de deslizamentos registrados e os graus de pertinência calculados é melhor visualizada nos diagramas de roseta da Figura 51.

Tabela 8 – Graus de pertinência das classes de orientação das encostas.

Classe	Área (ha)	Deslizamentos (total)	Pontos de treinamento	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
Norte	1418,23	21	13	1,440	0,232
Nordeste	1659,68	18	13	1,229	0,198
Leste	1923,09	16	11	0,896	0,144
Sudeste	1667,70	9	9	0,844	0,136
Sul	1520,33	8	8	0,824	0,133
Sudoeste	1103,69	7	5	0,710	0,114
Oeste	904,52	6	6	1,041	0,167
Noroeste	1091,16	11	7	1,007	0,162

Fonte: Elaborado pelo autor.

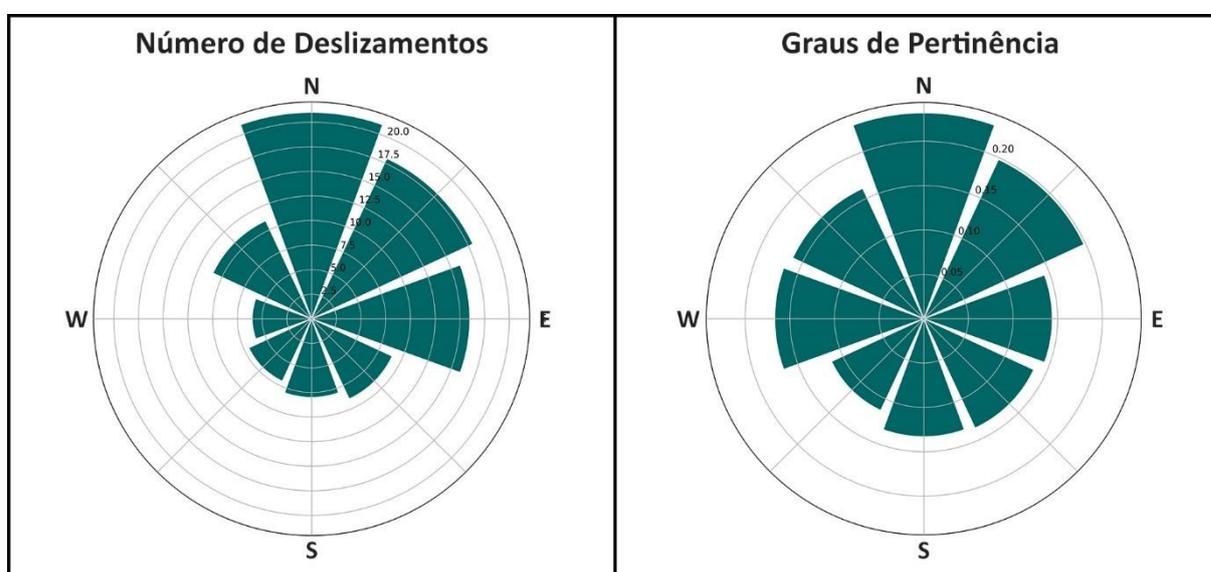


Figura 51 – Diagramas de roseta do número de deslizamentos registrados e graus de pertinência das classes de orientação das encostas. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.6. Uso e Ocupação do Solo

A classificação de uso e ocupação do solo na área de estudo resultou em cinco classes distintas – agricultura, área edificada, campos e pastagens, corpos d’água e vegetação –, sendo a vegetação a classe dominante no município, cobrindo 77,8% da área total (Figura 52).

Em geral, é possível notar uma tendência de que a ocupação priorize áreas planas e de baixa declividade, localizadas nas planícies aluviais dos rios, para urbanização e cultivo do arroz. As áreas mais declivosas e/ou de maior altitude, quando ocupadas, são utilizadas para pecuária e plantio de eucaliptos para produção de madeira (silvicultura). Apesar disso, exemplos pontuais de urbanização e agricultura em morros podem ser encontrados.

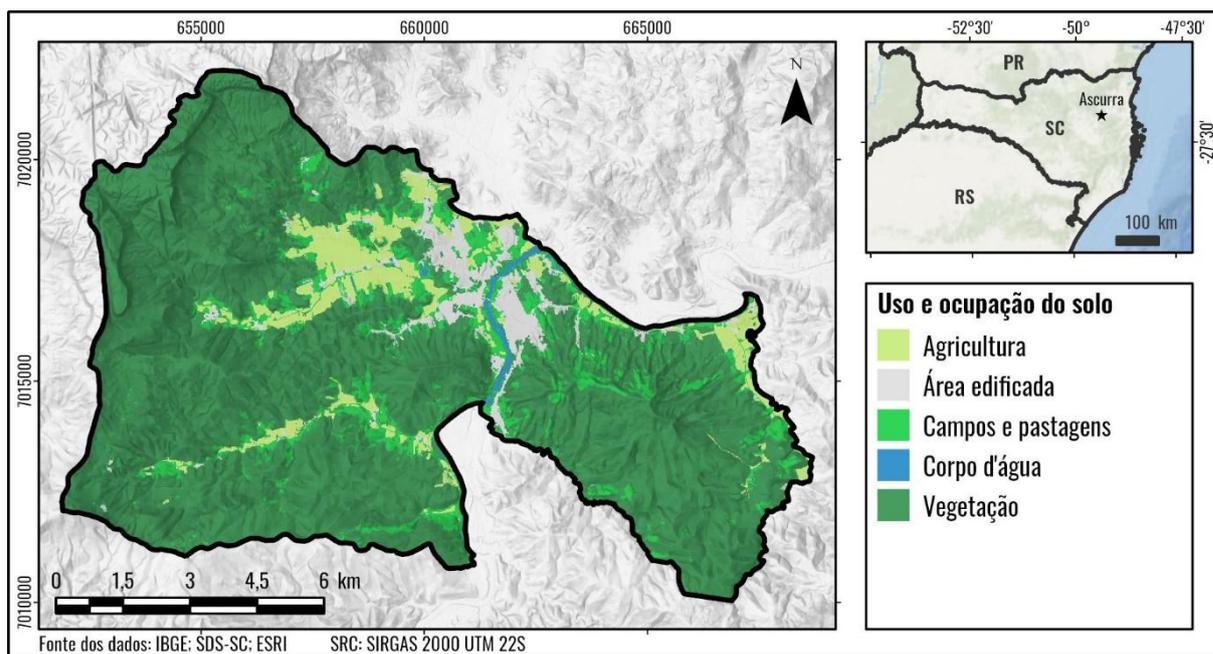


Figura 52 – Classes de uso e ocupação do solo utilizadas para a análise de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, sobrepostas a mapa de relevo sombreado. Fonte: Elaborado pelo autor.

As áreas de vegetação compreendem, sozinhas, 73 dos 96 deslizamentos mapeados na área de estudo. Apesar disso, as áreas classificadas como campos e pastagens foram aquelas que obtiveram o maior grau de pertinência (0,311), enquanto corpos d'água e áreas de agricultura tiveram grau de pertinência igual a zero (Tabela 9).

Tabela 9 – Graus de pertinência das classes de uso e ocupação do solo.

Classe	Área (ha)	Deslizamentos (total)	Pontos de treinamento	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
Agricultura	775,15	0	0	0,000	0,000
Área edificada	475,38	4	3	0,989	0,159
Campos e pastagens	1134,04	19	14	1,935	0,311
Corpo d'água	117,09	0	0	0,000	0,000
Vegetação	8786,74	73	55	0,981	0,158

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Coeficiente Kappa obtido para a classificação de uso e ocupação do solo, realizado através dos dados dispostos na matriz de erro (Tabela 10), foi de 0,91, demonstrando uma alta fidelidade dos resultados em relação à base de comparação (imagens do satélite CBERS-4A), com proporção observada de concordância (P_o) de 92,8%.

Tabela 10 – Matriz de erro de classificação (matriz de confusão).

Referência (CBERS-4A)						
	Corpo d'água	Vegetação	Campos e pastagens	Agricultura	Área edificada	Total

Classificação	Corpo d'água	40	2	7	1	0	50
	Vegetação	0	50	0	0	0	50
	Campos e pastagens	0	3	43	4	0	50
	Agricultura	0	0	0	50	0	50
	Área edificada	0	0	1	0	49	50
	Total	40	55	51	55	49	250

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4. MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS

Ao todo, foram gerados 7 mapas distintos de suscetibilidade a movimentos de massa, cada um com diferentes valores de *gamma* (entre 0,775 e 0,9), contendo cinco classes de suscetibilidade: Muito baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito alta. Considerando-se todos os sete mapas, a classe de Muito alta suscetibilidade ocupa entre 1,12% e 1,83% da área de estudo. A classe de Muito baixa suscetibilidade, por outro lado, varia entre 22,18% e 22,73%. A distribuição das porcentagens de área das classes de suscetibilidade de todos os mapas pode ser visualizada no gráfico a seguir (Figura 53).

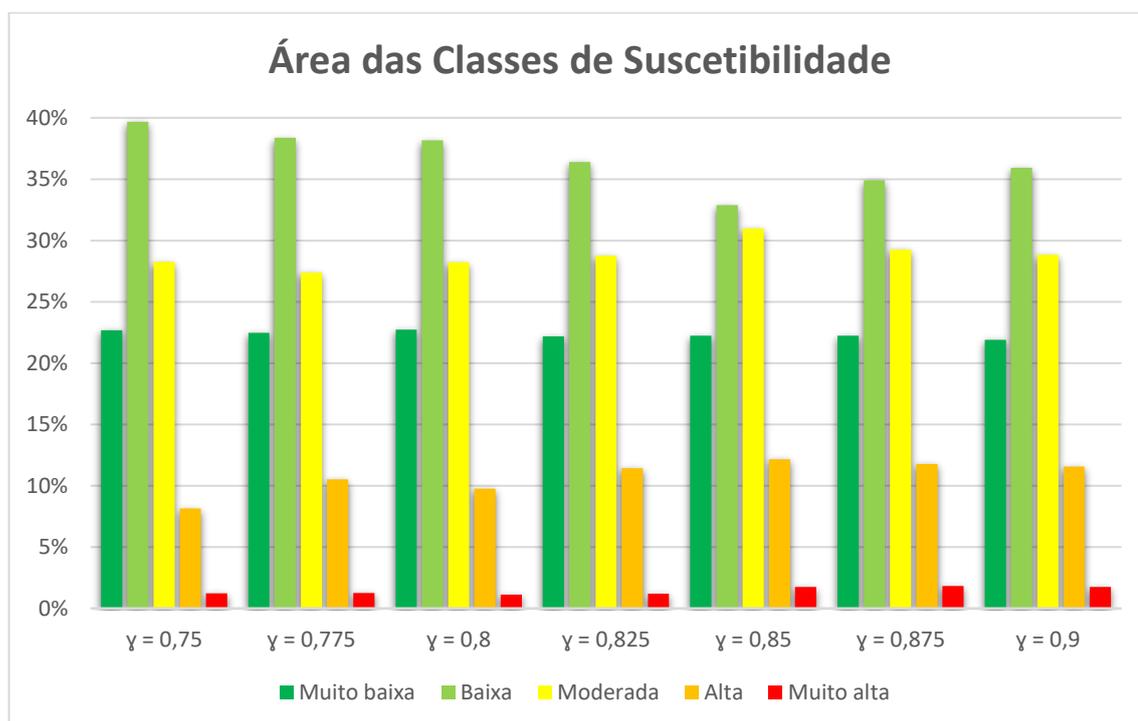


Figura 53 – Distribuição de áreas das classes de suscetibilidade nos mapas gerados. Fonte: Elaborado pelo autor.

A validação dos mapas via curva ROC resultou em valores de AUC entre 0,771 e 0,783, com média igual a 0,776, mediana igual a 0,775 e desvio padrão igual a 0,004. As curvas ROC para validação dos mapas estão dispostas na Figura 54.

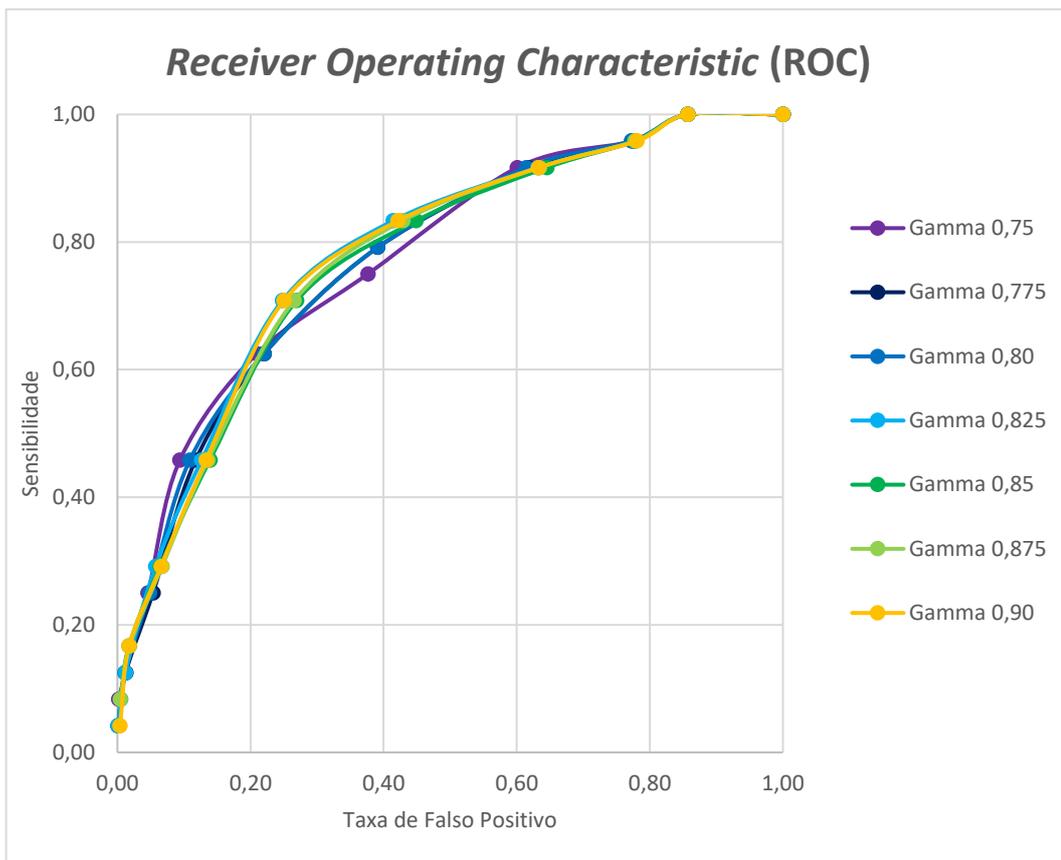


Figura 54 – Curvas ROC para os mapas de suscetibilidade a deslizamentos. Para geração das curvas, foram utilizados 10 intervalos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os mapas gerados, os valores de *gamma* com maior área abaixo da curva (AUC) foram $\gamma = 0,825$ e $\gamma = 0,9$, sendo 0,783 o maior valor de AUC obtido, com $\gamma = 0,825$. Esse valor corresponde a uma acurácia de 78,3% para a previsão de áreas de ocorrência futura de movimentos gravitacionais de massa. O gráfico abaixo (Figura 55) mostra os valores de AUC para todos os 7 mapas.

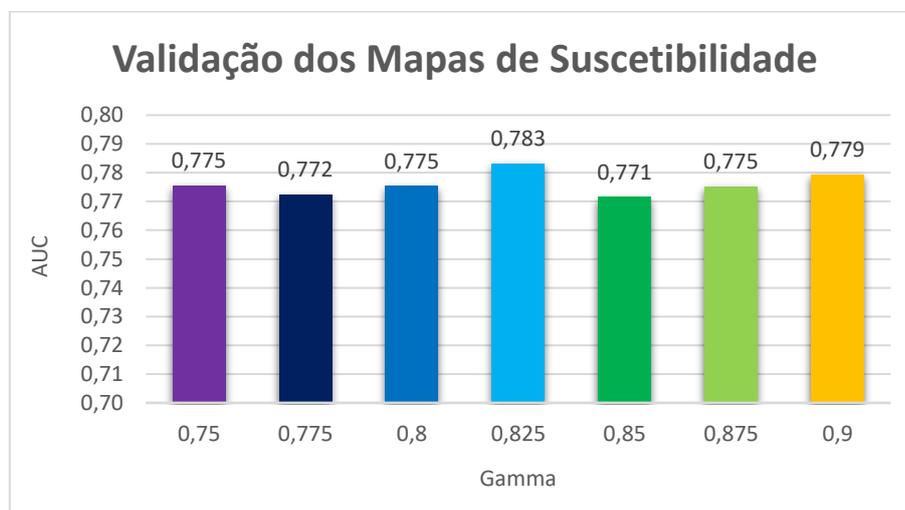


Figura 55 – Gráfico de valores de AUC para os mapas de suscetibilidade gerados. Fonte: Elaborado pelo autor.

Por ser o mapa com maior valor de AUC, o $\gamma = 0,825$ foi selecionado como resultado final do trabalho, estando disposto a seguir (Figura 56).

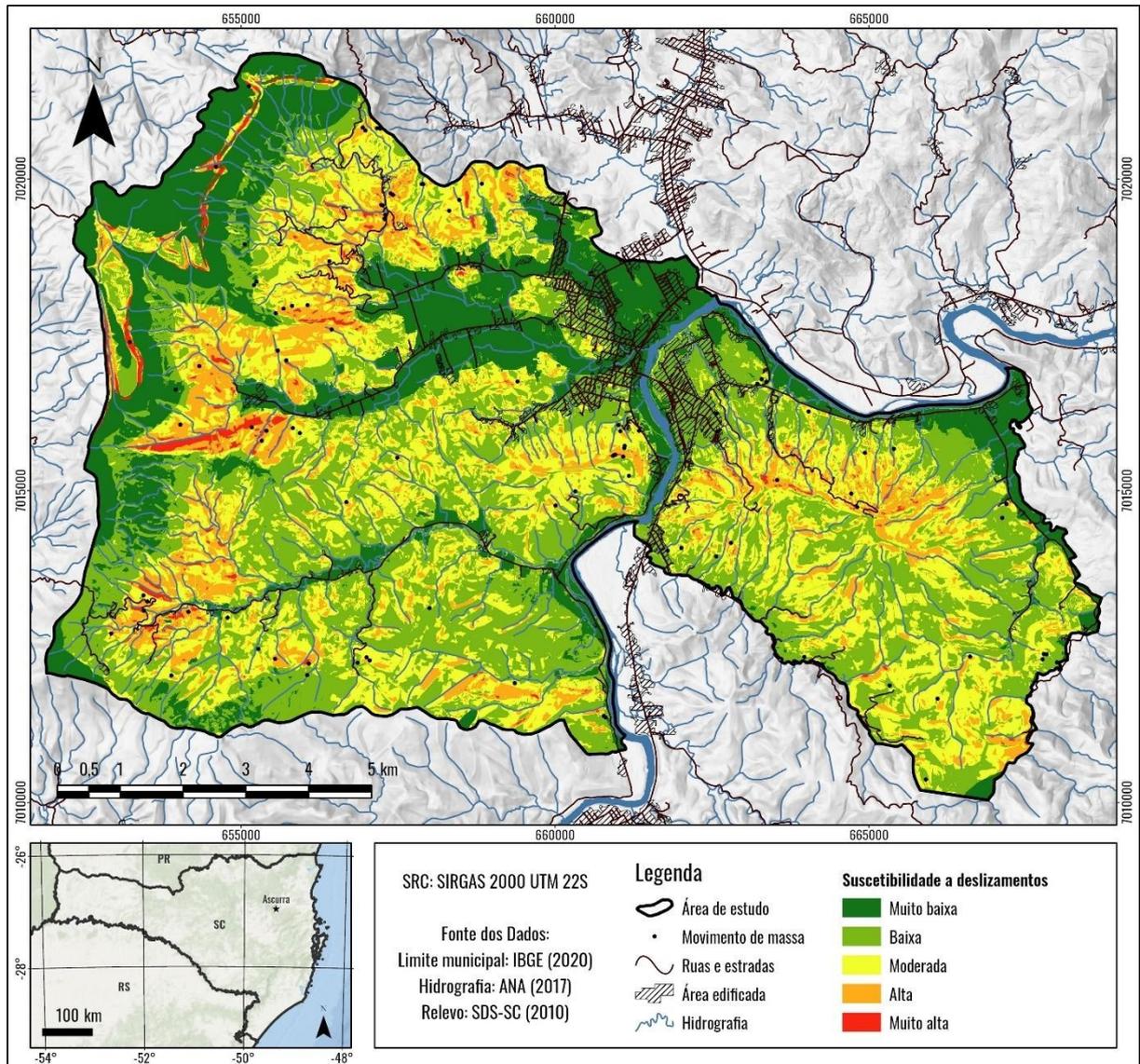


Figura 56 – Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa no município de Ascurra, utilizando-se $\gamma = 0,825$. O mapa em questão possui acurácia de 78,3%. Fonte: Elaborado pelo autor.

7. DISCUSSÕES

O mapeamento dos movimentos gravitacionais de massa na área de estudo demonstra que a maior parte dos deslizamentos ocorre de forma natural, em áreas de vegetação nativa densa. Apesar disso, também foram constatados, principalmente em campo, vários movimentos desencadeados por cortes para abertura de estradas, e o elevado grau de pertinência calculado para áreas de campos e pastagens mostra que a retirada da vegetação tende a instabilizar terrenos com pré-disposição ao desenvolvimento desses processos.

Os principais tipos de movimentos identificados foram os escorregamentos planares, com presença menos significativa de escorregamentos rotacionais e rastejos. Os escorregamentos estão distribuídos ao longo de áreas declivosas em praticamente todo o município, enquanto os rastejos estão presentes majoritariamente em áreas de campos pastagens, principalmente aquelas localizadas sobre rochas gnáissicas do CGSC e pelíticas da Bacia do Itajaí.

A declividade caracterizou-se como o fator de maior influência, devido aos graus de pertinência calculados, para a definição da suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo. Nota-se que maiores declividades implicam em maior suscetibilidade do terreno ao desencadeamento de movimentos de massa, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 57. Esse aumento da suscetibilidade em maiores declividades é bem documentado na literatura (TOMAZZOLI, FLORES e BAUZYS, 2009; TOMAZZOLI *et al.*, 2012; SBROGLIA e HIGASHI, 2013; LIMA, 2013; SCHRAMM, 2019). Nos termos deste trabalho, porém, declividades superiores a 60° obtiveram grau de pertinência zero, em função da ausência de deslizamentos mapeados nessas áreas. Isto se deve, possivelmente, a um maior predomínio, nesses locais, de movimentos como quedas de blocos no lugar de escorregamentos, em função do relevo escarpado. Tais movimentos são mais difíceis de serem identificados a partir de ortofotos e imagens de satélite, principalmente em áreas vegetadas, visto que não deixam grandes marcas no terreno, resultando na ausência de pontos de treinamento. Alternativamente, a falta de movimentos de massa pode também estar relacionada à ausência do manto de intemperismo nessas encostas íngremes.

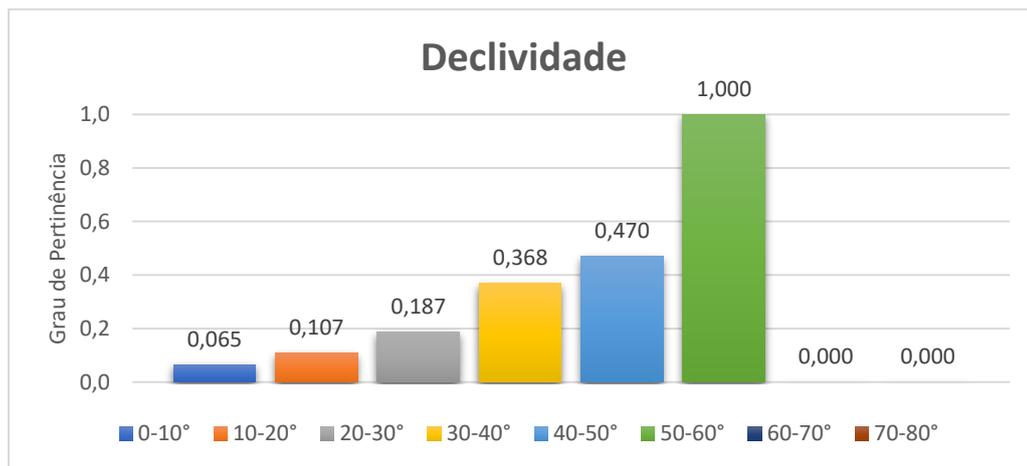


Figura 57 – Gráfico mostrando a relação entre as classes de declividade e seus graus de pertinência à análise de suscetibilidade a deslizamentos. Fonte: Elaborado pelo autor.

A orientação das encostas foi outro fator condicionante que demonstrou alta correlação com a suscetibilidade a deslizamentos. Os graus de pertinência calculados mostram que encostas voltadas para a direção norte são as mais propensas à ocorrência de deslizamentos. Em termos simplesmente quantitativos, as direções norte, nordeste e leste, somadas, abrangem 57,3% dos deslizamentos mapeados, sendo o destaque dessas classes evidente no diagrama de roseta com o número de deslizamentos por classe (Figura 51). Essa correlação dos movimentos de massa com as vertentes voltadas para norte e nordeste fora anteriormente observada também por Tomazzoli *et al.* (2012), Parizoto (2014) e Coutinho (2016), que atribuíram esse fenômeno à direção de entrada do sistema atmosférico responsável pelo desastre de 2008 na região, que se deu de nordeste para sudoeste. A direção nordeste também coincide com a direção predominante de entrada dos ventos no Vale do Itajaí entre os meses de agosto e fevereiro, assim como a direção de segunda maior predominância em vários outros meses do ano, sendo estes ventos originados do Anticiclone Semi-Permanente do Atlântico Sul, que fica posicionado ao longo do ano na latitude do litoral sudeste brasileiro (SILVEIRA, ALVES e MURARA, 2012). Supondo-se que tais ventos, advindos do oceano, carreguem umidade em direção ao continente, é possível concluir que as encostas voltadas para o quadrante nordeste, em condições normais, recebam a maior parte dessa umidade, tornando o solo nesses locais mais suscetível à saturação, aumento das poro-pressões e diminuição da resistência ao cisalhamento.

Em relação à litologia, as rochas com maior influência na suscetibilidade a deslizamentos foram os gnaisses do Complexo Granulítico de Santa Catarina. Esse comportamento já era esperado e é bem registrado na literatura sobre deslizamentos no Vale do Itajaí. Tomazzoli, Flores e Bauzys (2009), Bauzys (2010), Correia *et al.* (2013), Sbroglia e

Higashi (2013), Reginatto (2013), Parizoto (2014) e Mallmann (2018), entre outros autores, reconheceram anteriormente a maior suscetibilidade desses gnaisses e dos solos gerados sobre eles, principalmente cambissolos, ao desenvolvimento de movimentos gravitacionais de massa. Os maiores deslizamentos mapeados na área também desenvolveram-se sobre rochas gnáissicas. O maior grau de pertinência calculado para siltitos e argilitos da Bacia do Itajaí (identificados como siltitos e arenitos muito finos laminados durante o trabalho de campo), no entanto, parece estar em discordância com a literatura, que, no geral, identifica litologias sedimentares de granulometria mais grossa, como arenitos arcoseanos e conglomerados, como mais propensas à instabilidade (FLORES, PELLERIN e ÉGAS, 2009; TOMAZZOLI *et al.*, 2012; PARIZOTO, 2014; MALLMANN, 2018). Esses resultados são, no entanto, concordantes com aqueles obtidos por Schramm (2019) no município de Blumenau, que observou um maior grau de pertinência em litologias sedimentares de menor granulometria (siltitos e arenitos muito finos) e vulcânicas félsicas da Bacia do Itajaí. Os dados obtidos em campo foram insuficientes para a análise da influência das atitudes de acamadamento dessas rochas na suscetibilidade a movimentos de massa.

A representação conjunta de folhelhos, arenitos, diamictitos e outras litologias – rochas com granulometrias, textura e estrutura muito diferentes entre si – no mapa geológico também gerou certa inconsistência dos resultados nas áreas da Bacia do Paraná. Essas áreas, entretanto, estão localizadas em altitudes elevadas, de difícil acesso e, em geral, longe dos núcleos de ocupação urbana.

Conforme constatado em campo, a escala do mapa geológico não é suficiente para revelar detalhes importantes da geologia local. Pelo menos três ocorrências de rochas graníticas não mapeadas foram registradas em campo. Embora esses corpos graníticos possam ter distribuição espacial apenas local na porção sudoeste e oeste do município, a morfologia alongada dos morros presentes na região centro-leste da área de estudo, em conjunto com a evidência de campo (granitoide leucocrático encontrado no ponto ASC-03) e a representação dessas feições no mapa fotogeológico de Silva e Dias (1981), leva a crer que existam corpos plutônicos influenciando o relevo e os processos da dinâmica superficial nessa área.

A distância de estruturas demonstrou comportamento diferente do esperado, com pouca ou correlação aparente com a suscetibilidade a deslizamentos, em termos da relação de frequência e grau de pertinência calculados. Apesar disso, quando se analisa o número de deslizamentos em cada intervalo de distância, é possível notar que classes mais próximas (até

300 m) às zonas de falhas e fraturas possuem um número maior de movimentos de massa registrados (Figura 58).

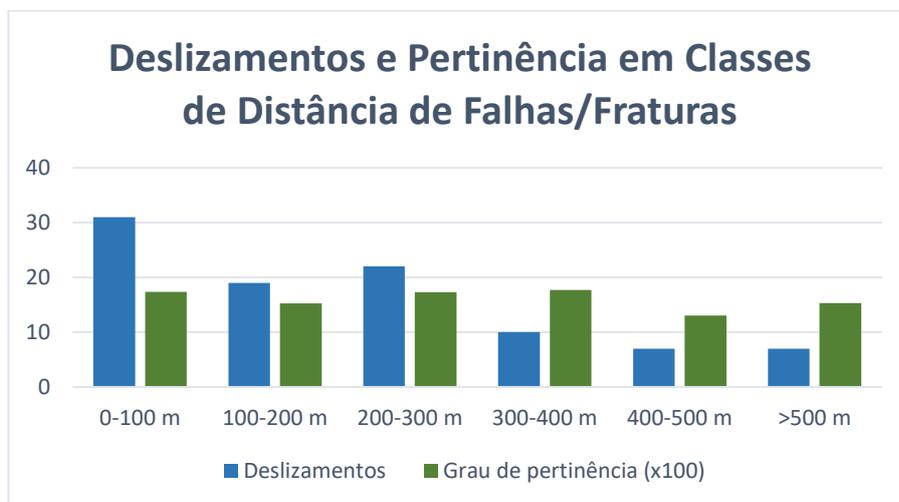


Figura 58 – Gráfico de comparação entre o número total de deslizamentos em cada classe de distância de falhas e seu grau de pertinência calculado. Para fins de representação, os graus de pertinência foram multiplicados por 100. É possível notar que, até 300 m de distância há uma maior ocorrência de deslizamentos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Em observação às estruturas mapeadas neste trabalho, constata-se que as estruturas mais proeminentes na área de estudo são aquelas de direção WNW, NNE e ENE. As estruturas de direção WNW têm presença mais significativa no CGSC e na Bacia do Itajaí, ocorrendo com maior densidade e continuidade nas porções leste e noroeste do município. Essas estruturas parecem tratar-se de falhas transcorrentes com movimentação sinistral, e têm uma relação de corte com estruturas de direção NNE, que estão bem representadas tanto na Bacia do Itajaí quanto no embasamento. As estruturas de direção ENE, por outro lado, ocorrem com pouco ou nenhum deslocamento, e são mais proeminentes na Bacia do Itajaí. Essas observações diferem um pouco do modelo de Schroeder (2006), que propõe que falhas de orientação WNW na Bacia do Itajaí possuem movimentação transcorrente dextral, falhas de direção NNE são transcorrentes sinistrais e falhas de direção ENE são reativações com deslocamento dextral.

Quanto ao fator altitude, foi possível notar que as faixas de maior influência na suscetibilidade a deslizamentos estão concentradas nas altitudes entre 750-900 m, que correspondem às regiões de escarpa da Serra Geral, e também em altitudes menores que 450 m, especialmente no intervalo de 150-300 m (Figura 59). O alto grau de pertinência da classe de 750-900 m foi influenciado pela coincidência com as escarpas, enquanto o baixo grau da faixa de 900-1050 m decorreu das baixas declividades dos planaltos acima das escarpas. Da mesma forma, é possível que os graus de pertinência obtidos para menores altitudes também sejam

derivados da influência de outros fatores, como as litologias mais suscetíveis (gnaisses do CGSC e rochas pelíticas e vulcânicas da Bacia do Itajaí), maior densidade de falhas e maior presença da ação antrópica (campos e pastagens) em áreas mais baixas.

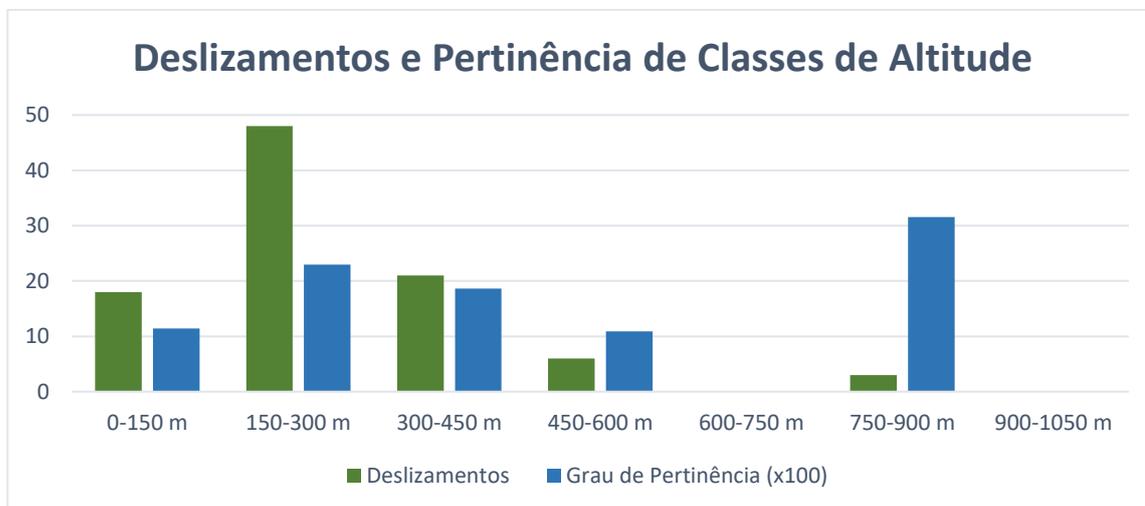


Figura 59 – Gráfico de comparação entre o número total de deslizamentos em cada classe de altitude e seu grau de pertinência calculado. Para fins de representação, os graus de pertinência foram multiplicados por 100. Fonte: Elaborado pelo autor.

Das 96 cicatrizes de deslizamento mapeadas, 39,6% estão localizadas na microbacia do Ribeirão São Paulo, na região noroeste de Ascurra (Figura 60). Essa microbacia também compreende 97,63 ha de áreas de Muito alta suscetibilidade a deslizamentos, o que equivale a 2,3% da área total da microbacia e a 71,62% da área total de Muito alta suscetibilidade no município inteiro. A Microbacia do Ribeirão São Paulo abrange a totalidade das escarpas da Serra Geral e boa parte da área do CGSC no município, além de outras áreas de elevada declividade. Nela, parte da drenagem tem aspecto moderadamente paralelo, com a maioria dos canais orientados na direção WNW, mostrando um certo controle estrutural. Isso é notável principalmente no entorno do Arroio Picadão, onde a drenagem desce as escarpas da Fm. Taciba em direção aos gnaisses do CGSC. Essa microbacia também inclui os maiores deslizamentos mapeados na área de estudo, ocorridos sobre gnaisses na localidade de Ribeirão Oitenta, próximo à divisa com Rodeio.

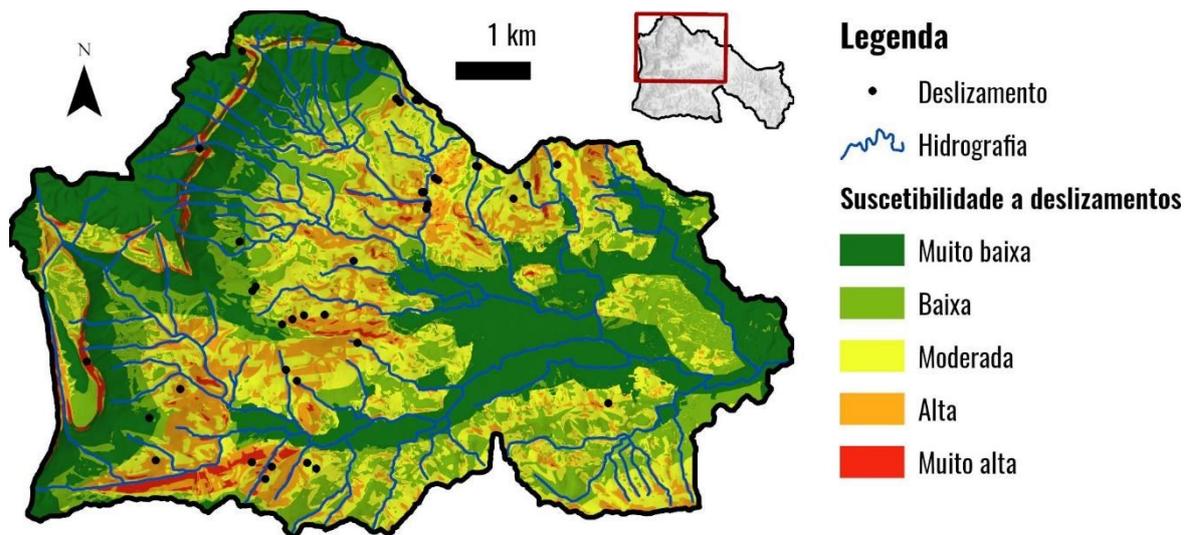


Figura 60 – Suscetibilidade a deslizamentos na microbacia do Ribeirão São Paulo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Aproximadamente 22,9% dos movimentos de massa foram registrados nas microbacias da região sudoeste do município, em especial na microbacia do Ribeirão Guaricana (Figura 61), que engloba por si só 17,7% do total de deslizamentos e 15,1% da área de Muito alta suscetibilidade do município. A drenagem nessa área segue um padrão paralelo a dendrítico, com canais lineares orientados nas direções NE e NW. Essa microbacia possui forte controle estrutural em seu vale principal, orientado na direção ENE, e compreende rochas de todas as unidades geológicas presentes na área de estudo, sendo as litologias da Bacia do Itajaí e os gnaisses do CGSC aquelas com as maiores quantidades de cicatrizes de deslizamento na microbacia.

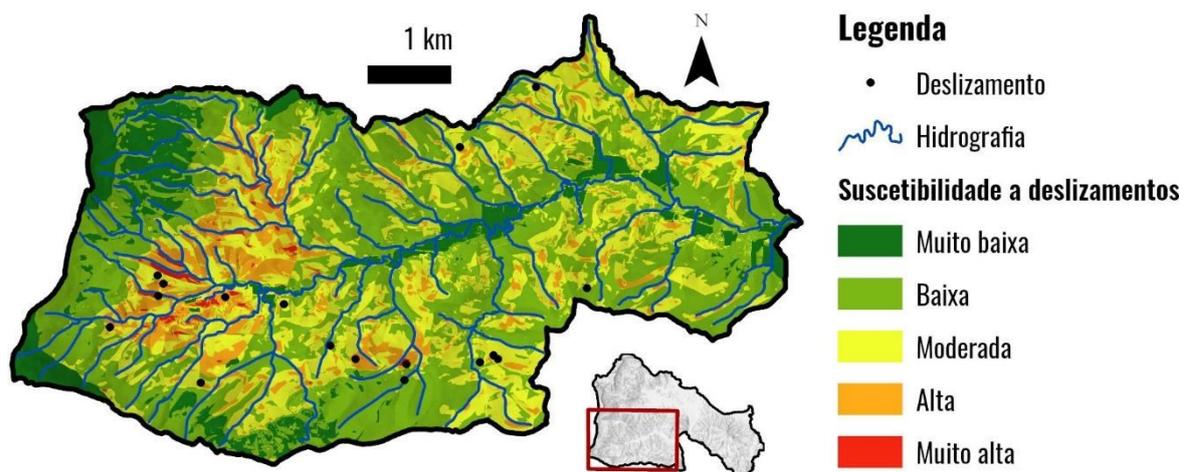


Figura 61 – Suscetibilidade a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Guaricana. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os 37,5% restantes do total de movimentos de massa mapeados estão distribuídos em microbacias de menor extensão na região central e leste da área de estudo. Nessas áreas, um outro padrão pode ser observado: a drenagem assume um aspecto radial nas encostas de morros

alongados, descendo para as microbacias do Ribeirão Santa Bárbara, Ribeirão Ilse e também através de canais que desaguam diretamente no Rio Itajaí-Açu. Essas microbacias englobam 11,25% da área de Muito alta suscetibilidade do município.

A Figura 62, a seguir, mostra a quantia de cicatrizes de deslizamento mapeadas em cada uma das 12 microbacias que compõem a área de estudo.

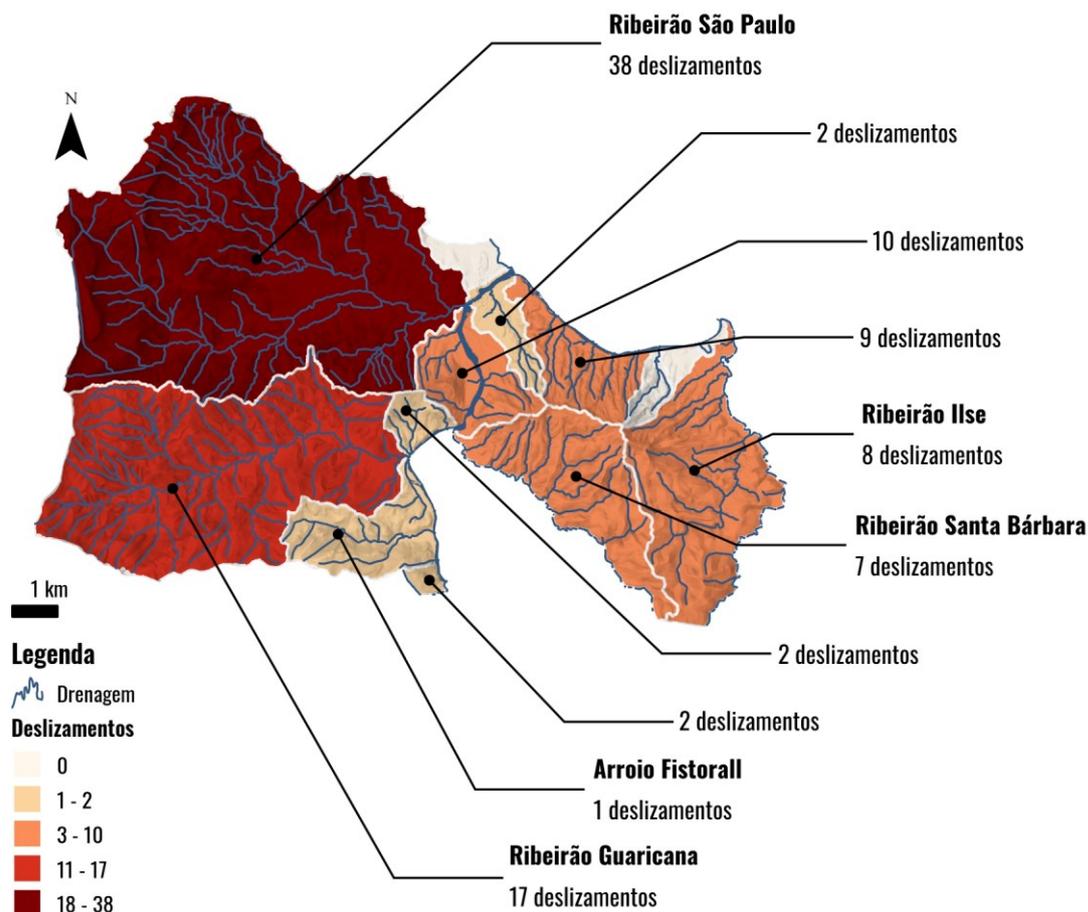


Figura 62 – Distribuição dos 96 movimentos de massa mapeados entre as diferentes microbacias que compõem a área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de suscetibilidade a movimentos de massa permite observar que a maior parte das zonas de muito alta suscetibilidade na área de estudo está localizada em áreas afastadas da ocupação urbana e de benfeitorias rurais. Apesar disso, a presença de zonas de alta suscetibilidade em pastagens íngremes adjacentes à localidade de Ribeirão Oitenta (Figura 63), situadas sobre gnaisses do CGSC, aliada à situação relatada por moradores em campo a respeito de escorregamentos passados e evidências de movimentação à montante do local, leva a crer que essa localidade pode sofrer com instabilidade no futuro.

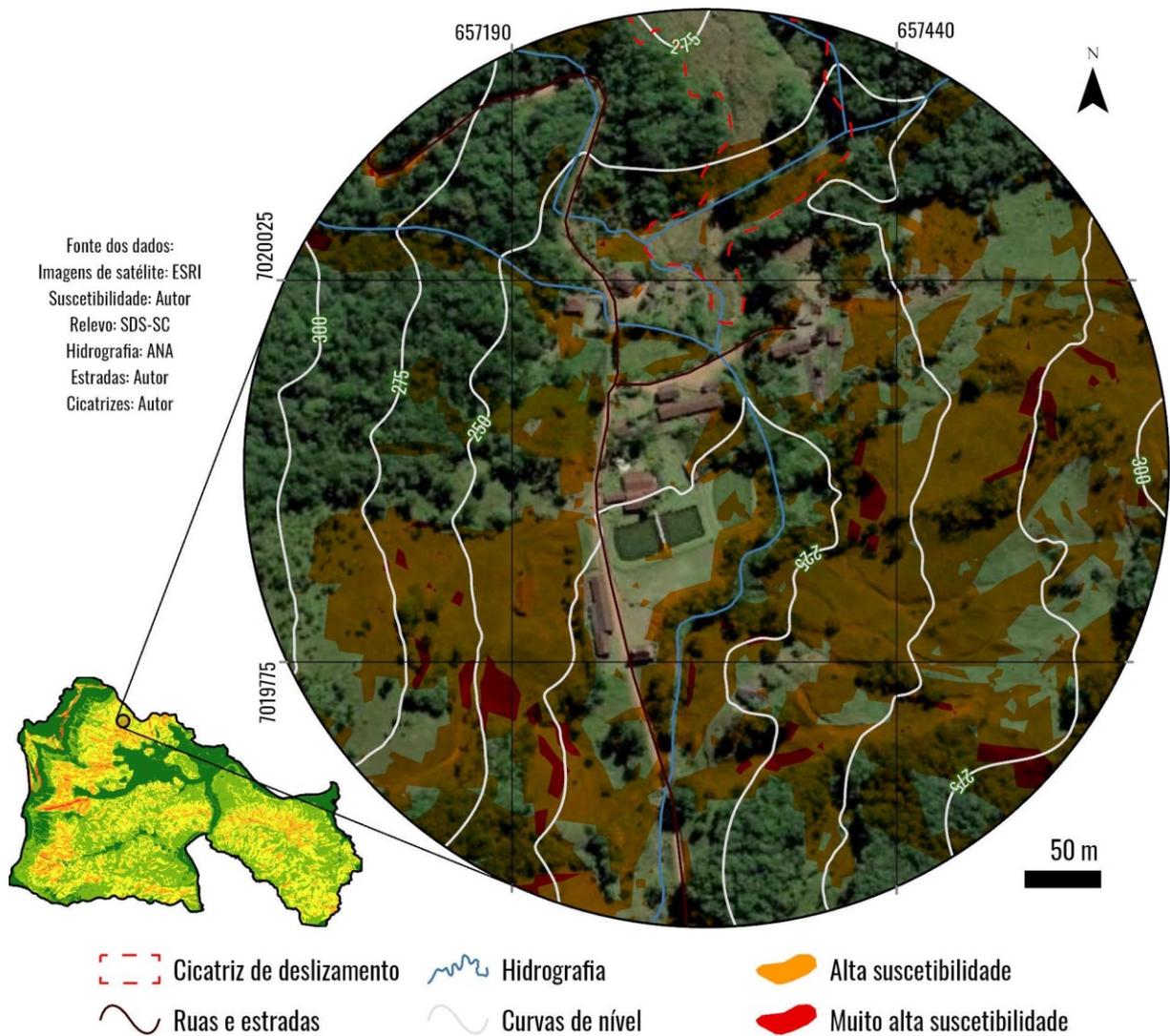


Figura 63 – Mapa de situação da localidade de Ribeirão Oitenta frente à suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa. Imagens do satélite Maxar. A área da cicatriz delimitada a norte da localidade atualmente se encontra vegetada e ocupada para silvicultura. Fonte: Elaborado pelo autor.

8. CONCLUSÕES

A atualização do inventário de deslizamentos do município de Ascurra resultou na identificação de 96 movimentos de massa, sendo 83 identificados por fotointerpretação, 2 obtidos de outros trabalhos e 11 mapeados em campo.

A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar que as áreas de maior suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na área de estudo são aquelas localizadas sobre gnaisses do Complexo Granulítico de Santa Catarina e siltitos e argilitos da Bacia do Itajaí, em altas declividades (especialmente na faixa dos 50-60°), em áreas de campos e pastagens e sobre encostas voltadas para o norte e nordeste.

O mapa de suscetibilidade a movimentos de massa gerado obteve $AUC = 0,783$, correspondendo a uma acurácia de 78,3%, e permite de maneira satisfatória a identificação das áreas mais propensas à ocorrência de deslizamentos. No entanto, o modelo pode ser aperfeiçoado com a utilização de dados em maior escala de detalhe, no caso da litologia, e também com a inclusão de outros fatores condicionantes à análise, como pedologia, distância da drenagem e forma das vertentes.

O mapa de suscetibilidade a deslizamentos elaborado neste trabalho traz uma visão geral das áreas com maior suscetibilidade a tais processos. A partir desse produto, é possível selecionar as áreas propensas ao desenvolvimento de movimentos de massa para realização de estudos sobre a mecânica das rochas e solos, com realização de ensaios geomecânicos em amostras coletadas nesses locais.

Atenção especial deve ser dada às microbacias do Ribeirão São Paulo e do Ribeirão Guaricana, com a realização de estudos de maior detalhe para a geração de mapas de risco a desastres, além do acompanhamento e monitoramento constante, por parte da Defesa Civil e Prefeitura Municipal, das suas encostas em períodos de chuva intensa e/ou prolongada.

Os resultados apresentados permitem dar por cumpridos os objetivos deste trabalho. Os dados gerados, principalmente na forma de arquivos vetoriais e *raster*, assim como *scripts* Python utilizados na análise, ficam disponíveis à comunidade acadêmica, podendo ser obtidos mediante contato com o autor pelo e-mail <gabrielmaccari.1997@gmail.com>.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANSOM, L. W. *et al.* **Slope stability and stabilization methods**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons INC, 2002.

ANBALAGAN, R. *et al.* Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach, a case study of Lachung Valley, Sikkim. **Geoenvironmental Disasters**, v. 2, n. 6, p. 1-17, 2015.

APPI, C. J.; SOUZA CRUZ, C. E. Estratigrafia de Seqüências na Bacia do Itajaí. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. **Anais [...]**. Natal: [s. n.], 1990. p. 93-106.

ARAÚJO, J. V. *et al.* Análise Multitemporal da Cobertura Vegetal do Morro do Baú, Ilhota/SC. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27., EXPOSICARTA, 26., 2017, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017. p. 591-595.

ASCURRA. Bem-vindos ao município de Ascurra. **Município de Ascurra**, 2014. Disponível em: <<https://www.ascurra.sc.gov.br/municipio/index/codMapaItem/19957>>. Acesso em: 16-30 Ago. 2021.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. *In*: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PUCRJ, v. 2, 1992. p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de risco de escorregamentos**: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP. 1994. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

BALTZER, A. **Ueber bergstürze in den Alpen**. Zürich: Verlag der Schabelitz'schen Buchhandlung (C. Schmidt), 1875. 50 p.

BASEI, M. A. S. **O cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina**. 1985. 195 p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

BASEI, M. A. S. *et al.* Evolução Tectônica dos Terrenos entre os Cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). **Revista Brasileira de Geologia**, v. 22, n. 2, Jun. 1992, p. 216-221.

BASEI, M. A. S. *et al.* Tectonic evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano belt, Santa Catarina, Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 32, n. 4, Dez. 2011b, p. 324-350.

BASEI, M. A. S. *et al.* The Itajaí foreland basin: a tectono-sedimentary record of the Ediacaran period, Southern Brazil. **International Journal of Earth Sciences**, v. 100, Out. 2011a, p. 543–569.

BASEI, M. A. S.; MCREATH, I.; SIGA JR., O. The Santa Catarina Granulite Complex of Southern Brazil: A Review. **Gondwana Research**, v. 1, n. 3-4, Out. 1998, p. 383-391.

BAUZYS, F. **Identificação, análise e mapeamento dos movimentos de massa ocorridos em novembro de 2008, no alto da Bacia do Ribeirão Belchior, Gaspar-SC.** 2010. 237 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

BAUZYS, F. Mapa de Inventário de Movimentos de Massa Ocorridos no Alto da Bacia do Ribeirão Belchior, Gaspar, Santa Catarina. **REVISTA GEONORTE, Edição Especial 1: Geografia Física**, v. 1, n. 4, Jun. 2012, p. 788-799.

BHANDARI, A. AUC-ROC Curve in Machine Learning Clearly Explained. **Analytics Vidhya**, 2020. Disponível em: <<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2020/06/auc-roc-curve-machine-learning/>>. Acesso em: 16 Dez. 2021.

BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis: Editora da UFSC, v. 3, 2003. 552 p.

BINI, G. M. P. **Análise dos movimentos de massa nas microbacias fluviais: Saltinho, Belchior Baixo, Sertão e Porto Arraial-Gaspar-SC.** 2012. 165 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

BIONDI, J. C.; SCHICKER, G.; BUGALHO, A. Processos Mineralizadores em Bacias Tardi-Orogênicas 1: Influência das Estruturas Rígidas na Geração dos Depósitos da Minepar e do Ribeirão da Prata, Grupo Itajaí (SC). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 3, Set. 1992, p. 275-288.

BIONDI, J. C.; XAVIER, R. P. Fluidos Associados à Mineralização da Mina de Ouro Schramm, Complexo Granulítico Luis Alves (SC). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 2, Jun. 2002, p. 235-244.

BLASCHKE, T. *et al.* Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 87, p. 180-191, 2014.

CEPED UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012 /** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

CEPED UFSC. **Resposta ao desastre em Santa Catarina no ano de 2008: avaliação das áreas atingidas por movimentos de massa e dos danos em edificações durante o desastre.** Florianópolis: CEPED UFSC, 2009.

CORREIA, M. R. D. *et al.* Aplicação da técnica Pesos de Evidência (Weights of Evidence - WofE) para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na região do baixo vale do Itajaí-SC. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2013. p. 6010-6017.

CORREIA, M. R. D. **Avaliação de Diferentes Técnicas de Modelagem e de Dados Espaciais Aplicadas à Análise de Risco a Deslizamentos no Baixo Vale da Bacia do Rio Itajaí-Açu SC.** 2015. 425 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

COUTINHO, I. **Análise da Suscetibilidade a Movimentos de Massa na Área Urbana do Município de Rodeio - SC**. 2016. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CPRM. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2014. 1 mapa, color., 155 x 105 cm. Escala 1:500.000.

CPRM; IPT. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000 (livro eletrônico)**: nota técnica explicativa / coordenação Omar Yazbek Bitar – São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014.

CRED. **The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019)**. 2020. Disponível em: < <https://www.emdat.be/publications>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

DE TONI, G. B. *et al.* Dom Feliciano Belt orogenic cycle tracked by its pre-collisional magmatism: The Tonian (ca. 800 Ma) Porto Belo Complex and its correlations in southern Brazil and Uruguay. **Precambrian Research**, v. 342, Jun. 2020, p. 1-25.

DELGADO, I. M. *et al.* Geotectônica do Escudo Atlântico. *In*: BIZZI, L. A., et al. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, 2003. p. 227-334.

DUTRA, E. B. Reconhecimento topográfico e geológico no Estado de Santa Catarina, Brasil. **Boletim DNPM/SGM**, Rio de Janeiro, v. 21, p. 31-56, 1926.

FELL, R. *et al.* Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**, v. 102, 2008, p. 85-98.

FLORES, J. A. A.; PELLERIN, J. R. G. M. Movimentos Gravitacionais de Massa no Município de Gaspar, Vale do Itajaí, SC, na catástrofe de novembro de 2008. Caracterização dos processos por critérios geomorfológicos, geológicos e pedológicos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa. **Anais [...]**. Viçosa: UFV, 2009.

FOODY, G. M. On the Compensation for Chance Agreement in Image Classification Accuracy Assessment. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 58, n. 10, Out. 1992, p. 1459-1460.

FRAGA, N. C. Clima, gestão do território e enchentes no Vale do Itajaí-SC. **Terra Livre**, São Paulo, v. 1, n. 20, Jan./Jul. 2003, p. 159-170.

FREIRE, E. S. M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Revista Construção**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 95, p. 10-18, 1965.

Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí**. 2010. Disponível em: <http://www.aguas.sc.gov.br/base-documental-rio-itajai/noticias-rio-itajai/item/download/173_162158b668453a53c5b010ac0aa1f41f>. Acesso em: 17 Ago. 2021.

GALLI, M. *et al.* Comparing landslide inventory maps. **Geomorphology**, v. 94, n. 3-4, Fev. 2008, p. 268-289.

GUADAGNIN, F. *et al.* Depositional age and provenance of the Itajaí Basin, Santa Catarina State, Brazil: Implications for SW Gondwana correlation. **Precambrian Research**, v. 180, n. 3-4, Jul. 2010, p. 156-182.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. 194 p.

GUZZETTI, F. *et al.* Comparing Landslide Maps: A Case Study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. **Environmental Management**, New York, v. 25, n. 3, Mar. 2000, p. 247-263.

GUZZETTI, F. *et al.* Landslide inventory maps: New tools for an old problem. **Earth-Science Reviews**, v. 112, n. 1-2, Abr. 2012, p. 42-66.

HADLICH, I. W. **Estudo de inclusões fluidas do Granito Parapente, Gaspar - SC, Brasil: implicações para a evolução da Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó**. 2015. 121 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

HARTMANN, L. A. The Mesoproterozoic Supercontinent Atlantica in the Brazilian Shield - Review of Geological and U-Pb Zircon and Sm-Nd Isotopic Evidence. **Gondwana Research**, v. 5, n. 1, Jan. 2002, p. 157-163.

HARTMANN, L. A. *et al.* Ion microprobe (SHRIMP) dates complex granulite from Santa Catarina, southern Brazil. **An. Acad. Bras. Ci.**, v. 72, n. 4, Dez. 2000, p. 559-572.

HARTMANN, L. A.; SILVA, L. C.; ORLANDI FILHO, V. Complexo Granulítico de Santa Catarina: Descrição e implicações genéticas. **Acta Geol Leopoldensia**, v. 3, n. 6, 1979, p. 93-112.

HEILBRON, M. *et al.* Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V., *et al.* **Geologia do continente sul-americano: : evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 203-234.

HELLER, B. M. *et al.* Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Luís Alves Terrane: Archean to Paleoproterozoic evolution and Neoproterozoic overprint. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 106, Mar. 2021, p. 1-17.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides**. Reston: U.S. Geological Survey, 2008. 129 p.

HOELZEL, M.; BELLETTINI, A. S. **Ação Emergencial para Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes e Movimentos de Massa: Ascurra, SC**. [s. l.]: CPRM, 2015. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18496>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, n. 2, Apr. 2014, p. 167-194.

IGLESIAS, C. M. F. *et al.* **Geologia e recursos minerais da folha Joinville - SG.22-Z-B: estado de Santa Catarina**. Porto Alegre: CPRM, 2011. 106 p. 1 mapa, color. Escala 1:250.000.

- KAUL, P. F. T. **Projeto Brusque-Serra do Tabuleiro**. [S.l.]: DNPM/CPRM, 1976. 165 p.
- KAUL, P. F. T. O Cráton de Luiz Alves. Camboriú, SC. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 31., 1980, Camboriú. **Anais [...]**. Camboriú: [s. n.], v. 5, 1980, p. 2677-2683.
- KHAN, H. *et al.* Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 22, n. 1, p. 11-24, Abr. 2019.
- KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos**. Curitiba: Organic trading, 2006. 109 p.
- KORMANN, T. C. **Ocupação de Encostas no Município de Blumenau - SC: Estudo da Formação de Áreas de Risco a Movimentos de Massa**. 2014. 147 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- KOSKO, B.; ISAKA, S. Fuzzy Logic. **Scientific American**, v. 269, n. 1, p. 76-81, Jul. 1993.
- KREBS, A. S. J. *et al.* Modelo geométrico-cinemático e relações com o Cinturão Granulítico e Cinturão Metavulcano-Sedimentar Brusque: instalação, preenchimento e inversão da bacia. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 36., 1990, Natal. **Anais [...]**. Natal: [s. n.], v. 6, 1990, p. 2966-2975.
- KREBS, A. S. J.; CALDASSO, A. L. S.; LOPES, R. C. Interpretação preliminar da seqüência deposicional da bacia do Itajaí na área da folha Botuverá - SC. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35., 1988, Belém. **Anais [...]**. Belém: [s. n.], v. 2, 1988, p. 592-605.
- LEE, S. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. **Environmental Geology**, v. 52, 2007, p. 615-623.
- LEITE, G. T. D.; PINHEIRO, R. Z. G.; PAMBOUKIAN, S. V. D. Monitoramento de Áreas de Risco com a Utilização de Técnicas de Geoprocessamento. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 19, n. 1, 2019, p. 28-47.
- LIMA, G. M. A. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos por critérios topográficos: um estudo no alto da Bacia do Ribeirão Belchior, Gaspar-SC**. 2013. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- MAACK, R. Breves Notícias Sobre a Geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Curitiba, v. 2, n. 7, 1947, p. 64-154.
- MALLMANN, P. **Mapeamento da Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa no Bairro Nova Esperança (Blumenau/SC)**. 2018. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. *In: MANTESSO-NETO, V., et al. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flavio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 265-279.

MILANI, E. J. *et al.* Sequences and stratigraphic hierarchy of the Parana Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. **Boletim IG USP, Série Científica**, v. 29, 1998, p. 125-173.

MILANI, E. J. *et al.* Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, Mai./Nov. 2007, p. 265-287.

OSAKO, L. S. Updating landslide inventory maps using high resolution digital orthophotos and Digital. **ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, v. V-3-2021, Jun. 2021, p. 251-255.

PÁNEK, T. Landslides and Related Sediments. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, Jan. 2020, p. 1-21. Disponível em: <www.researchgate.net/publication/341535831_Landslides_and_Related_Sediments>.

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**. 2014. 304 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PASSARELLI, C. R. *et al.* Primeira evidência de magmatismo básico calimiano no terreno registro - SE do cinturão Ribeira - estado de São Paulo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45., 2010, Belém. **Anais [...]**. Belém: [s. n.], 2010. p. 885.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JR., F. **Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology**. *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, n. 1, Jun. 2016, p. 83-104.

PINTO, R. C.; PASSOS, E.; CANEPARO, S. C. Considerações a Respeito dos Condicionantes Utilizados em Pesquisas Envolvendo Movimentos de Massa. **Geoingá**, Maringá, v. 5, n. 1, 2013, p. 102-124.

POFFO, I. R. D. **Caracterização e Diagnóstico Sócio-ambiental do Município de Ascurra: O papel das potencialidades locais e regionais na construção do desenvolvimento sustentável**. 2001. 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

REGINATTO, G. M. P. **Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha. Rio dos Cedros-SC, com ênfase em escorregamentos translacionais**. 2013. 230 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

REICHENBACH, P. *et al.* A review of statistically-based landslide susceptibility models. **Earth-Science Reviews**, v. 180, Mai. 2018, p. 60–91.

RONCHI, F. C. **Análise Estrutural da Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó**. 2014. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ROSA, R. O. Geologia. *In*: **Projeto Gerenciamento Costeiro – Gerco (3ª Fase): Relatório técnico**. Florianópolis: IBGE, 2002.

ROSTIROLLA, S. P. *et al.* Basin analysis and mineral endowment of the Proterozoic Itajaí Basin, south-east Brazil. **Basin Research**, v. 11, n. 2, Dez. 1999, p. 127-142.

ROSTIROLLA, S. P.; ALKMIM, F. F.; SOARES, P. C. O Grupo Itajaí, Estado de Santa Catarina, Brasil: exemplo de sedimentação em uma bacia flexural de antepaís. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 6, 1992, p. 109-122.

SALAMUNI, R.; BIGARELLA, J. J.; TAKEDA, F. K. Considerações sobre estratigrafia e tectônica da Série Itajaí. **Boletim Paranaense de Geografia**, v. 4/5, 1961, p. 188-201.

SANTA CATARINA. Ascurra. **Governo de Santa Catarina**, 2021. Disponível em: <<https://www.sc.gov.br/conhecasc/municipios-de-sc/ascurra>>. Acesso em: 29 Jul. 2021.

SANTOS, E. V.; MARIMON, M. P. C. Caracterização dos Movimentos de Massa na Microbacia do Rio Itoupava, Município de Rio do Sul / SC - Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, n. 47E, 2011, p. 1-17.

SBROGLIA, R. M. *et al.* Mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC, com o uso de modelagem matemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 2, 2016, p. 339-354.

SBROGLIA, R. M.; HIGASHI, R. A. R. Mapeamento geotécnico preliminar de áreas suscetíveis a movimentos de massa na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2013. p. 9300-9307.

SCHRAMM, L. F. P. **Análise de suscetibilidade a movimentos de massa da microbacia do Córrego Gebien, bairro Valparaíso, Blumenau (SC)**. 2019. 97 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SCHROEDER, G. S. **Análise Tectônica da Bacia do Itajaí**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SCHULZ JR., A.; ALBUQUERQUE, L. F. F.; GIFFONI, L. E. **Geologia da Quadrícula de Rio do Sul, SC**. Porto Alegre: DNPM, 1969. 109 p.

SEMA, H. V.; GURU, B.; VEERAPPAN, R. Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India. **Model. Earth Syst. Environ.**, v. 3, p. 499–514, Mai. 2017.

SHAHABI, H.; HASHIM, M.; AHMAD, B. B. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy logic methods at the central Zab basin, Iran. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 12, Jun. 2015.

SHARPE, C. F. S. **Landslides and Related Phenomena: A Study of Mass-movements of Soil and Rock**. New York: Columbia University Press, 1938. 137 p.

SILVA JR., C. H. L. Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao Zoneamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos: Uma Revisão. **Revista Monografias Ambientais - REMOA**, Santa Maria, v. 14, n. 3, p. 42-58, Set.-Dez. 2015.

SILVA JR., C. H. L. *et al.* Zoneamento da Susceptibilidade a Deslizamentos Induzidos com Base na Lógica Fuzzy e no Processo Analítico Hierárquico (AHP): O Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Anil, São Luís - MA. **Revista Brasileira de Cartografia: Edição Especial – Movimentos de Massa e Processos Erosivos**, v. 68, n. 9, 2016, p. 1819-1837.

SILVA, L. C.; DIAS, A. B. **Projeto Timbó Barra Velha: relatório preliminar**. Porto Alegre: CPRM, 1981, 3 v.

SILVA, L. C. O Cinturão Metavulcanossedimentar Brusque e a Evolução Policíclica das Faixas Dobradas Proterozóicas no Sul do Brasil: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 1, Mar. 1991, p. 60-73.

SILVEIRA, R. B.; ALVES, M. P. A.; MURARA, P. Estudo de Caracterização da Direção Predominante dos Ventos no Litoral de Santa Catarina. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 10., 2012, Manaus. **Anais [...]**. Manaus: [s. n.], 2012, p. 380-392.

TASCA, F. A. **Gestão da Drenagem Urbana na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí-Açu**. 2012. 141 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

TOMAZZOLI, E. R. *et al.* **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**. Florianópolis: Departamento de Geociências - UFSC, 2012. 142 p.

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*: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 5., 2009, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: [s. n.], 2009, p. 1-10.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP**. 2007. 220 p. Tese (Doutorado em Ciências - Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. D. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. 196 p.

VARNES, D. J. Landslide types and processes. *In*: ECKEL, E. B. **Landslides and engineering practice**. Washington: National Academy of Sciences, 1954. p. 20-47.

VARNES, D. J. Slope Movement Types and Processes. *In*: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. **Landslides: Analysis and Control**. Washington: National Academy of Sciences, 1978. p. 12-33.

VELJANOVSKI, T.; KANJIR, U.; OŠTIR, K. Object-based image analysis of remote sensing data. **Geodetski Vestnik**, v. 55, p. 641-664, 2011.

WIECZOREK, G. F. Landslide Triggering Mechanisms. *In*: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. **Landslides: Investigation and Mitigation**. Washington: Transportation Research Board, National Research Council, 1996. p. 76-90.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Inform. Control**, v. 8, 1965, p. 338-353.

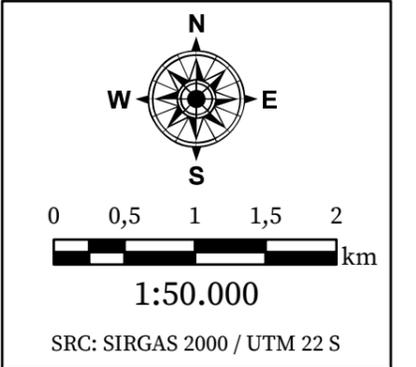
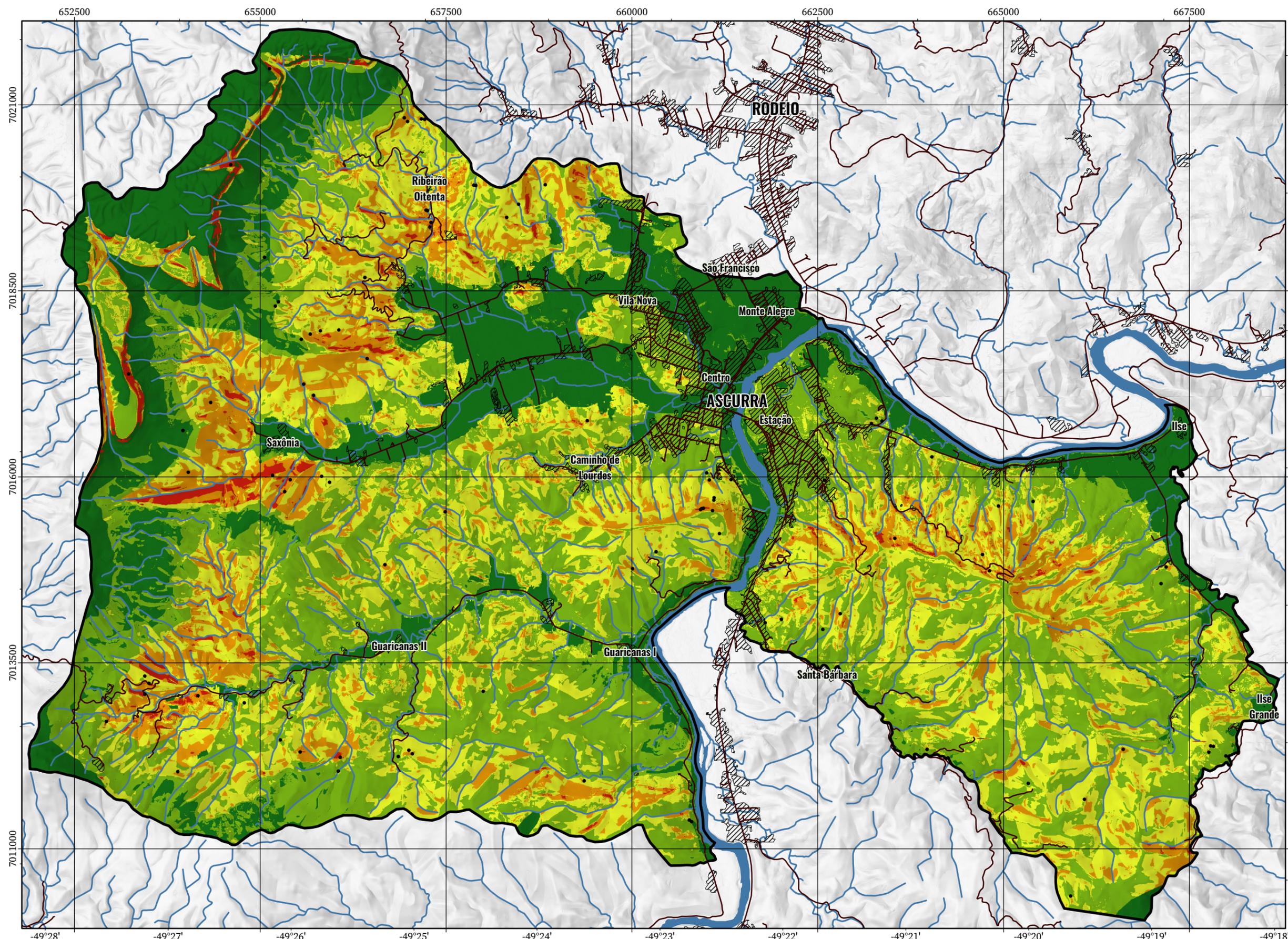
ZADEH, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. SMC-3, n. 1, p. 28-44, Jan. 1973.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *In*: KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A. Zadeh**. Singapore: World Scientific, v. 6, 1996. p. 394-432.

ZALÁN, P. V. *et al.* The Paraná Basin, Brazil. *In*: LEIGHTON, M. W., et al. **AAPG Memoir 51, Interior Cratonic Basins**. [s. l.]: American Association of Petroleum Geologists, 1990. p. 681-708.

ZIELINSKI, J. P. T. **Estratigrafia de Sequências de Sucessões Sedimentares Eopermianas da Borda Sudeste da Bacia do Paraná, Estado de Santa Catarina**. 2014. 82 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

APÊNDICE 1 – MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS



Fonte dos dados:
 Limites municipais: IBGE (2020)
 Movimentos de massa: Autor
 Estradas: Autor
 Área edificada: Autor
 Hidrografia: ANA (2017)
 Suscetibilidade a deslizamentos: Autor
 Relevo: SDS-SC (2010)

**Mapa de
 Suscetibilidade a
 Movimentos de Massa**

Município de Ascurra

Elaboração: Gabriel Maccari
 Ano: 2022

Legenda		Suscetibilidade a deslizamentos	
Área de estudo	Ruas e estradas	Muito baixa	Alta
Movimento de massa	Área edificada	Baixa	Muito alta
	Hidrografia	Moderada	