

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS UNIVERSITÁRIO REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA (DGL)
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Vicente Henrique Ferencz Wetter

**Estudo de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio
Encano, Indaial, Santa Catarina.**

Florianópolis

2023

Vicente Henrique Ferencz Wetter

**Estudo de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio
Encano, Indaial, Santa Catarina.**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Geologia do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador (a): Profa. Dra. Liliana Sayuri Osako

Florianópolis

2023

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

Wetter, Vicente

Estudo de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio Encano, Indaial, Santa Catarina. / Vicente Wetter ; orientadora, Liliana Osako, 2023. 115 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

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

Vicente Henrique Ferencz Wetter

Estudo de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da microbacia do Rio Encano, Indaial, Santa Catarina.

Este Trabalho 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, 10 de fevereiro de 2023.

Prof.(a) Manoela Bettarel Bállico, Dr.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Profa. Liliana Sayuri Osako, Dra.
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Murilo da Silva Espíndola, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

João André Martins, MSc.
Avaliador
Universidade Estadual de Campinas

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente àqueles que constituem os alicerces para edificação de toda minha jornada, ao meu pai por me despertar a paixão pela natureza, a curiosidade e a sede por compreensão da mesma, e por tantas idas e vindas à Florianópolis. À minha mãe, por ter o poder de estar sempre perto mesmo estando longe, por toda a preocupação, amor e cuidado. Ao meu irmão, por estar presente e garantir que a minha graduação se mantivesse, até mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha orientadora, professora Liliana, por ser minha mentora ao longo da minha caminhada geológica, por todo seu tempo investido, pela sua paciência, e pela dedicação em me ajudar a desenvolver este trabalho.

Aos meus amigos de rocha, que se tornaram uma família para mim, estando presentes todos os dias e todos os momentos em meu período acadêmico que, com certeza, são amizades que levarei comigo para toda a vida.

À Universidade Federal de Santa Catarina por proporcionar a realização desta graduação. Ao Departamento de Geologia e a todos os professores, que permitiram que eu me tornasse não apenas um observador da natureza e da paisagem, mas também um intérprete.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma me auxiliaram na confecção deste trabalho, muito obrigado!

“O homem, ministro e intérprete da natureza, faz e entende tanto quanto constata, pela observação dos fatos ou pelo trabalho da mente, sobre a ordem da natureza; não sabe nem pode mais.”

(Francis Bacon)

RESUMO

Apesar de a região do Vale do Itajaí possuir uma recorrência histórica de desastres naturais, principalmente deslizamentos e inundações, o município de Indaial, no médio Vale do Itajaí, ainda carece de estudos de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa (MGM). Tais processos resultam da combinação favorável de condições do meio físico. Considerando a relação entre a distribuição espacial dos fatores condicionantes e dos MGMs, é possível calcular a probabilidade de sua ocorrência e gerar cartas de suscetibilidade a partir do inventário de cicatrizes de MGMs e de tais fatores. Neste sentido, o trabalho em questão tem como objetivo principal analisar a suscetibilidade a MGMs da sub-bacia do Rio Encano, localizada no município de Indaial/SC. Tal análise baseou-se no método guiado pelos dados (*data-driven*), através da técnica de modelagem espacial por pesos de evidência, que permitiu analisar as relações espaciais entre um conjunto de fatores condicionantes (unidades litoestratigráficas, estruturas geológicas, declividade, cobertura vegetal e altitude) e 283 cicatrizes de MGMs. A atualização do inventário de MGMs foi realizada através da fotointerpretação de ortofotos, modelos digitais de terreno e de superfície e imagens do satélite CBERS-4A, e também da identificação de cicatrizes de MGMs em trabalho de campo. Foram destinados 70% dos pontos de cicatrizes de MGM para a atribuição dos pesos pela aplicação do método de pesos de evidência, enquanto os 30% restantes foram reservados para a etapa de validação dos resultados. A análise dos fatores condicionantes demonstrou que áreas onde ocorrem rochas metapelíticas e metapsamíticas do Complexo Metamórfico Brusque, em altitudes e declividades elevadas (50-60°), em encostas voltadas para norte e nordeste, próximo a estruturas geológicas e em áreas com vegetação rasteira e/ou esparsa são as mais propensas à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. O mapa de suscetibilidade a MGMs foi categorizado em 5 classes: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. A validação do mapa foi efetuada por meio da curva de *Receiver Operating Characteristics* (ROC) e pela *Area Under Curve* (AUC), resultando em uma acurácia de 79%. Dentre os pontos de cicatrizes de MGMs mapeados, 75% se encontram em áreas de alta a muito alta suscetibilidade. O mapa de suscetibilidade a MGM permite observar que as áreas mais críticas da sub-bacia do Rio Encano se encontram em áreas afastadas da ocupação urbana, em especial na região sul da área de estudo. Contudo, há ocorrências pontuais ao longo da sub-bacia localizadas próximo a atividades antrópicas, merecendo a devida atenção.

Palavras-chave: Deslizamentos. Geologia. Vale do Itajaí. Pesos de evidência.

ABSTRACT

Although the Itajaí Valley region has a historical recurrence of natural disasters, mainly landslides and floods, the municipality of Indaial, in the Middle Itajaí Valley, still lacks gravitational mass movement (GMM) susceptibility studies. Such processes result from the combination of conditions in the physical environment. Considering the relationship between the spatial distribution of conditioning factors and GMMs, it is possible to calculate the probability of their occurrence and generate susceptibility maps from GMMs scar inventory and such factors. Therefore, the main objective of this study is to analyze the GMM susceptibility of the Encano River sub-basin, located in the municipality of Indaial/SC. Such analysis was based on the data-driven method, through the Weights of Evidence (WofE) technique of spatial modeling, which allowed the analysis of spatial relationships between a set of conditioning factors (lithostratigraphic units, geological structures, slope, vegetation cover and altitude) and 283 GMM scars. The GMM inventory update was carried out through photointerpretation of orthophotos, digital terrain and surface models and images from the CBERS-4A satellite, and also through the identification of GMM scars on the field. 70% of the GMM scar points were used to calculate weights for the weight of evidence method, while the remaining 30% were reserved for results validation. The analysis of the conditioning factors showed that areas where metapelitic and metapsamitic rocks of the Brusque Metamorphic Complex occur, at high altitudes and slopes (50-60°), on slopes facing north and northeast, close to geological structures and in areas with low or sparse vegetation are the most prone to the occurrence of gravitational mass movements. The GMM susceptibility map was divided into 5 classes: very low, low, moderate, high and very high. The map validation was performed using the Receiver Operating Characteristics (ROC) curve and the Area Under Curve (AUC), resulting in an accuracy of 79%. Among the mapped GMM scar points, 75% are found in areas of high to very high susceptibility. The susceptibility map shows that the most critical areas of the Encano River sub-basin are found in areas far from urban occupation, especially in the southern region of the study area. However, there are occasional occurrences along the sub-basin that are located close to anthropic activities, demanding attention and further studies.

Keywords: Landslides. Geology. Itajaí Valley. Weights of Evidence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização da área de estudo, no município de Indaial/SC.	19
Figura 2 - Gráfico mostrando a curva hipsométrica da Bacia do Rio Itajaí-Açu. Fonte: Santa Catarina, 2017.....	20
Figura 3– Mapa das bacias hidrográficas de Santa Catarina, com destaque para a Bacia do Rio Itajaí-Açu.....	21
Figura 4 - Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano (Brasil – Uruguai). Zonas de Cisalhamento dúcteis: (1) Itajaí-Perimbó, (2) Major Gercino, (3) Caçapava do Sul, (4) Dorsal de Canguçu, (5) Passo do Marinheiro, (6) Ibaré, (7) Sarandí del Yí, (8) Sierra Ballena, (9) Cerro Amaro, (10) Arroio Grande. Extraído de Phillip <i>et al.</i> (2016).....	23
Figura 5– Contexto geotectônico da região da área de estudo. Fonte: Basei <i>et al.</i> 2011.	24
Figura 6 – Mapa geológico da área da sub-bacia do Rio Encano. Fonte: Wildner <i>et. al.</i> , 2014.	26
Figura 7 – Mapa geológico da Bacia do Itajaí: 1 Quaternário; 2 Sill básico; 3 Bacia do Paraná; 4 Granito Subida; 5 Fm. Apiúna; 6 Fm. Ribeirão do Bode; 7 Fm. Ribeirão Neisse; 8 Fm Ribeirão do Carvalho; 9 Fm Baú; 10 Grupo Brusque; 11 Complexo São Miguel; 12 Complexo Granulítico de Santa Catarina. Fonte: Basei <i>et al.</i> , (2011).....	34
Figura 8 - Mapa do contexto geomorfológico do estado de Santa Catarina com destaque para a área de estudo. Fonte: IBGE.....	38
Figura 9- Partes e termos de um deslizamento (extraído de Highland e Bobrowsky, 2008 modificado de Varnes, 1978).....	40
Figura 10 - a) Esquema de escorregamento rotacional e b) Escorregamento rotacional em Jaraguá do Sul, SC, dez.2008. Fonte: Tominaga <i>et al.</i> 2015.	41
Figura 11- Esquema de um escorregamento translacional. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).	42
Figura 12- Esquema de um escorregamento em cunha. Fonte: Tominaga <i>et al.</i> (2015).	42
Figura 13 – Esquema de queda de rochas. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).....	43
Figura 14 - Esquema de fluxo de detritos. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).....	44
Figura 15- Esquema representando rastejo e algumas formas de identificação do processo: Highland e Bobrowsky (2008).	45
Figura 16 – Fluxograma geral das atividades que foram executadas neste trabalho.....	61

Figura 17 – Fluxograma mostrando as etapas envolvidas na confecção do inventário de MGM.....	62
Figura 18 - Exemplo de cicatriz de movimento de massa delimitada pela linha vermelha. A) Identificação de cicatriz em ortofoto. B) Cicatriz exibida em ortofoto sobre MDT em visualização tridimensional. C) Cicatriz exibida em MDS. D) Cicatriz exibida MDT.....	63
Figura 19 – Fluxograma de dados utilizados para confecção dos mapas de fatores condicionantes.	65
Figura 20 – Mapa de localização das cicatrizes de MGM discriminadas pela fonte de obtenção na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.	74
Figura 21 – Mapa mostrando ocorrência de movimentos gravitacionais de massa ocorridos na área de estudo e proximidades. A) Deslizamento de grandes proporções identificado em ortofoto de 2010, localizado a nordeste da sub-bacia do Rio Encano. B) Imagem do satélite Maxar Techlogies datada de 2022 ilustrando diversas ocorrências de MGM ocorridos entre os municípios de Indaial e Blumenau, na região sudeste da sub-bacia.....	76
Figura 22: Mapa de localização das cicatrizes de movimento de massa identificadas em campo na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.....	77
Figura 23: Movimentos gravitacionais de massa identificados em trabalho de campo. A) Escorregamento Translacional em beira de estrada (DSL-06). B e F) Rastejos em estágio avançado em áreas de pastagem (DSL-05 e DSL-10). C e E) Escorregamento de grande proporção em beira de estrada, ocorrido em siltitos e argilitos da Bacia do Itajaí, marcando indícios de queda de rocha mesmo após sua ocorrência (DSL-07). D) Escorregamento em beira de estrada ocorrido em ritmitos da Bacia do Itajaí (DSL-10).....	78
Figura 24: Cicatrizes de MGM mapeadas em produtos obtidos por sensores remotos e reconhecidas em campo. A, B, E e F) Cicatrizes encontradas ao longo de uma trilha na região sul da área de estudo (DSL-15, DSL-14, DSL-13 e DSL- 12). C) Cicatriz vista à distância de estrada em zona rural (DSL-11). D) Cicatriz próxima ao caminho de uma trilha, exibindo a vegetação secundária (samambaias).....	79
Figura 25 Mapa com a distribuição dos pontos de treinamento e validação localizados na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.	81
Figura 26 – Mapa de classes de unidades litoestratigráficas utilizadas para a análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.....	82
Figura 27 – Mapa das classes de distância de principais estruturas geológicas utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.	84

Figura 28 - Mapa das classes de declividade utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano.	86
Figura 29 - Mapa das classes de orientação das encostas utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano do Rio Encano, Indaial, SC.	88
Figura 30 - Mapa das classes de cobertura vegetal utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano.	90
Figura 31 - Mapa das classes de altitude utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano.	92
Figura 32 - Distribuição de áreas das classes de suscetibilidade a MGM.	94
Figura 33 – Mapa de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio Encano gerado pelo método peso de evidência (WofE).	95
Figura 34 - Curva ROC para o mapa de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio Encano gerado pelo método peso de evidencia.	96
Figura 35 – Gráfico ilustrando a relação entre as classes de distância de principais estruturas geológicas e seus valores de contraste.	99
Figura 36 - Gráfico ilustrando a relação entre as classes de declividade e seus valores de contraste.	100
Figura 37 – Gráfico mostrando o número de ocorrências de cicatrizes de MGM dos pontos de validação nas distintas classes de suscetibilidade a MGM.	102
Figura 38 – Localização de áreas mais suscetíveis a ocorrência de MGM na sub-bacia do Rio Encano.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados relacionados as cicatrizes dos movimentos de massa mapeados na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.	75
Tabela 2 – Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos ($W+$ e $W-$) e valor de contraste (C) das classes da evidência unidades litoestratigráficas.	83
Tabela 3 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos ($W+$ e $W-$) e valor de contraste (C) das classes da evidência distância de principais estruturas geológicas.....	85
Tabela 4 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos ($W+$ e $W-$) e valor de contraste (C) das classes da evidência declividade.	87
Tabela 5 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos ($W+$ e $W-$) e valor de contraste (C) das classes da evidência orientação das encostas.	89
Tabela 6 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos ($W+$ e $W-$) e valor de contraste (C) das classes da evidência Cobertura Vegetal.....	91
Tabela 7 - Matriz de erro de classificação (matriz de confusão).....	91
Tabela 8 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos ($W+$ e $W-$) e valor de contraste (C) das classes da evidência altitude.	93

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
2.1	LOCALIZAÇÃO E ACESSO	19
2.2	CARACTERÍSTICAS FÍSIOGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-AÇU.	20
2.3	GEOLOGIA	22
2.3.1	Geologia Estrutural Regional	27
2.3.2	Complexo Granulítico de Santa Catarina (CGSC)	28
2.3.3	Complexo Ribeirão da Prata	30
2.3.4	Complexo Metamórfico Brusque (CMB)	31
2.3.5	Bacia do Itajaí	32
2.4	CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO	37
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
3.1	MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA	39
3.2	TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	40
3.2.1	Escorregamentos	40
3.2.2	Queda de blocos	43
3.2.3	Corridas ou Fluxo de detritos	43
3.2.4	Rastejo	44
3.3	FATORES CONDICIONANTES DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	45
3.4	SUSCETIBILIDADE, PERIGO, VULNERABILIDADE E RISCO	46
3.5	MAPAS DE INVENTÁRIOS DE DESLIZAMENTOS	47

3.6	ANÁLISE POR PESOS DE EVIDÊNCIA (WEIGHTS OF EVIDENCE – WofE)	48
4	ESTUDOS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA DA REGIÃO	53
5	MATERIAIS E MÉTODO	59
5.1	MATERIAIS	59
5.2	MÉTODO	60
5.2.1	Atualização do Inventário de Movimento Gravitacional de Massa	61
5.2.2	Trabalho de campo	64
5.2.3	Seleção dos pontos de treinamento e validação	64
5.2.4	Fatores Condicionantes	64
5.2.5	Aplicação do método pesos de evidência	69
5.2.6	Confecção do mapa de suscetibilidade à MGM	70
5.2.7	Validação dos resultados	70
6	RESULTADOS	73
6.1	INVENTÁRIO DE CICATRIZ DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA	73
6.1.1	Movimentos gravitacionais de massa identificados em trabalho de campo	76
6.1.2	Pontos de treinamento e validação	80
6.2	ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES	81
6.2.1	Unidades litoestratigráficas	81
6.2.2	Distância das principais estruturas geológicas	84
6.2.3	Declividade	85
6.2.4	Orientação das encostas	87
6.2.5	Cobertura Vegetal	89
6.2.6	Altitude	91
6.3	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA	93
7	DISCUSSÕES	97
8	CONCLUSÕES	105
	REFERÊNCIAS	106

1. INTRODUÇÃO

Movimento Gravitacional de Massa (MGM) é o processo de queda ou descida de solo, rocha ou ambos, sob a ação gravitacional, resultando em formações geológicas de diferentes geometrias com limites laterais e uma superfície de ruptura definida (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008). A ocorrência deste processo está ligada a diversos fatores, dentre eles se destacam os altos índices pluviométricos, uma vez que a saturação do solo em superfícies de declividade é a principal causa de deslizamentos. Além da chuva, fatores induzidos pelo homem, como a perturbação e alteração dos padrões de drenagem, desestabilização de encosta e remoção da vegetação podem dar início a processos de movimento de massa. Este processo, além de ter efeitos naturais como a alteração do meio físico e da morfologia superficial, pode afetar estruturas e áreas habitadas, causando transtornos a sociedade e até mesmo colocando vidas em risco.

A elaboração de estratégias de prevenção e redução dos riscos causados por eventos de desastres naturais são medidas eficazes na mitigação dos danos. Segundo Kobiyama *et al.* (2006) a prevenção de desastres naturais é menos onerosa quando comparada a obras de recuperação. Neste contexto, a análise de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa é uma importante ferramenta na prevenção de desastres e na gestão de riscos, pois permite identificar áreas propensas a ocorrência de movimentos de massa segundo atributos favoráveis, onde se presume a existência de relações funcionais entre fatores condicionantes e os deslizamentos. Nesse tipo de análise são produzidos mapas de suscetibilidade a deslizamento, que, de acordo com Zhu e Huang (2006), é um dos campos de estudo que retrata a distribuição espacial de uma encosta romper.

O território do estado de Santa Catarina, mais especificamente a região do Vale do Itajaí enfrenta desastres naturais como deslizamentos há muito tempo, possuindo registros desde o início da sua colonização, por volta de 1850 (SEVERO *et al.*, 2011). Dentre estes eventos destaca-se o episódio de 2008, no qual houve a precipitação de elevados índices pluviométricos concentrados em poucos dias, com um volume de precipitação acumulada que passou em 700% a média histórica precedidos de 3 meses de precipitação contínua (SEVERO *et al.*, 2011).

A área de estudo corresponde a cerca de 1/3 do município de Indaial e está localizada no Médio Vale do Itajaí. Segundo o Estudo Técnico Socioambiental do Município de Indaial (INDAIAL, 2019), a região revela um histórico de produção do espaço urbano em

constante conflito com o meio natural. Tal evolução está intimamente associada ao processo de desenvolvimento socioeconômico da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí, onde a malha urbana desenvolveu-se ao longo de cursos d'água e posteriormente nas encostas dos morros (INDAIAL, 2019). O processo de desenvolvimento, aliado à localização geográfica da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí, que favorece a entrada de umidade vinda do Oceano Atlântico em direção ao continente, subordinado a condição climática quente e úmida, faz com que o município seja alvo de frequentes e intensas precipitações e, conseqüentemente de desastres naturais, colocando a população local em situação de risco (INDAIAL, 2019).

Através de métodos que utilizam Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e técnicas de processamento digital de imagens é possível mapear áreas mais suscetíveis a deslizamentos de forma ágil, permitindo a integração de diferentes condicionantes de escorregamentos. Este método, aliado ao emprego de dados pré-existentes do meio físico, e do inventário de deslizamentos permite representar espacialmente os MGM's, atribuir peso aos fatores condicionantes, identificar as áreas mais propensas à ocorrência de deslizamento e gerar um mapa de suscetibilidade que auxilie na gestão de riscos de desastres naturais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Movimentos gravitacionais de massa (MGM), a depender do local de ocorrência podem ter conseqüências devastadoras, sendo responsáveis por causar danos em estruturas e áreas habitadas e alguns casos pelo soterramento e morte de pessoas. Além da iminente ameaça à vida humana, existe ainda o problema ambiental, uma vez que deslizamentos tem como uma de suas conseqüências a remoção do solo, favorecendo a erosão. Dessa forma, constantemente são associados à prejuízos econômicos, ambientais e sociais (HONG, ADLER e HUFFMAN, 2007). Estes danos podem ser atenuados ou até mesmo evitados quando se tem conhecimento dos fatores causadores do evento (INTARAWICHIAN e DASANANDA, 2010).

A análise de suscetibilidade de MGM indica a potencialidade de ocorrer um deslizamento, segundo classes de probabilidade de ocorrência baseadas em atributos favoráveis ao desencadeamento do evento. O estudo de suscetibilidade a MGM demonstra-se uma estratégia de prevenção e redução dos riscos decorrentes de deslizamento, utilizado no controle e gestão de desastres naturais. Kobiyama *et al.* (2006) ressalta que a prevenção de

desastres naturais possui menor custo quando comparada a recuperação de áreas afetadas por desastres naturais, sendo que cada R\$ 1 investido em prevenção equivale, em média, entre R\$ 25 e 30 de obras de reconstrução pós-evento.

O município de Indaial, apesar do constante problema com desastres naturais carece de estudos prévios que auxiliem na prevenção de MGM. Desta maneira, é de grande importância a realização de trabalhos de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, visto que podem auxiliar na identificação de áreas mais propensas a ocorrência de deslizamentos, ajudando na prevenção e contribuindo para a redução de desastres naturais relacionados a este tipo de evento em parte do Município.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa da sub-bacia do Rio Encano, localizada no município de Indaial, SC.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Atualizar o inventário de movimento gravitacional de massa do município de Indaial;
- Identificar áreas de maior probabilidade de ocorrência de movimento gravitacional de massa;
- Confeccionar um mapa de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da região de estudo.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de estudo compreende a sub-bacia hidrográfica do Rio Encano situada na região leste do município de Indaial/SC (Figura 1). A cidade de Indaial possui cerca de 430 km² e está a 51 metros de altitude, posicionada na Latitude 26°53'51" Sul e Longitude 49°13'54" Oeste. Faz fronteira com Timbó ao Norte/Oeste, com Rodeio ao Sul/Sudoeste, Blumenau a Leste/Sudeste e Pomerode a Nordeste (CIDADE-BRASIL, 2021).

O acesso à área de estudo é feito pela BR-470, seguido pelo Complexo Viário Bernardo Wolfgang Werner e posteriormente pelas ruas Henrique Weise, Bahia e Dr. Blumenau, até chegar à Rua Lorenz, a qual se estende por quase toda a área de estudo, uma vez que se encontra paralela ao Rio Encano. A sub-bacia possui área de aproximadamente 140 km² e abrange uma área antropizada adjacente ao Rio Encano a norte, e áreas destinadas à silvicultura e de formação florestal a sul.

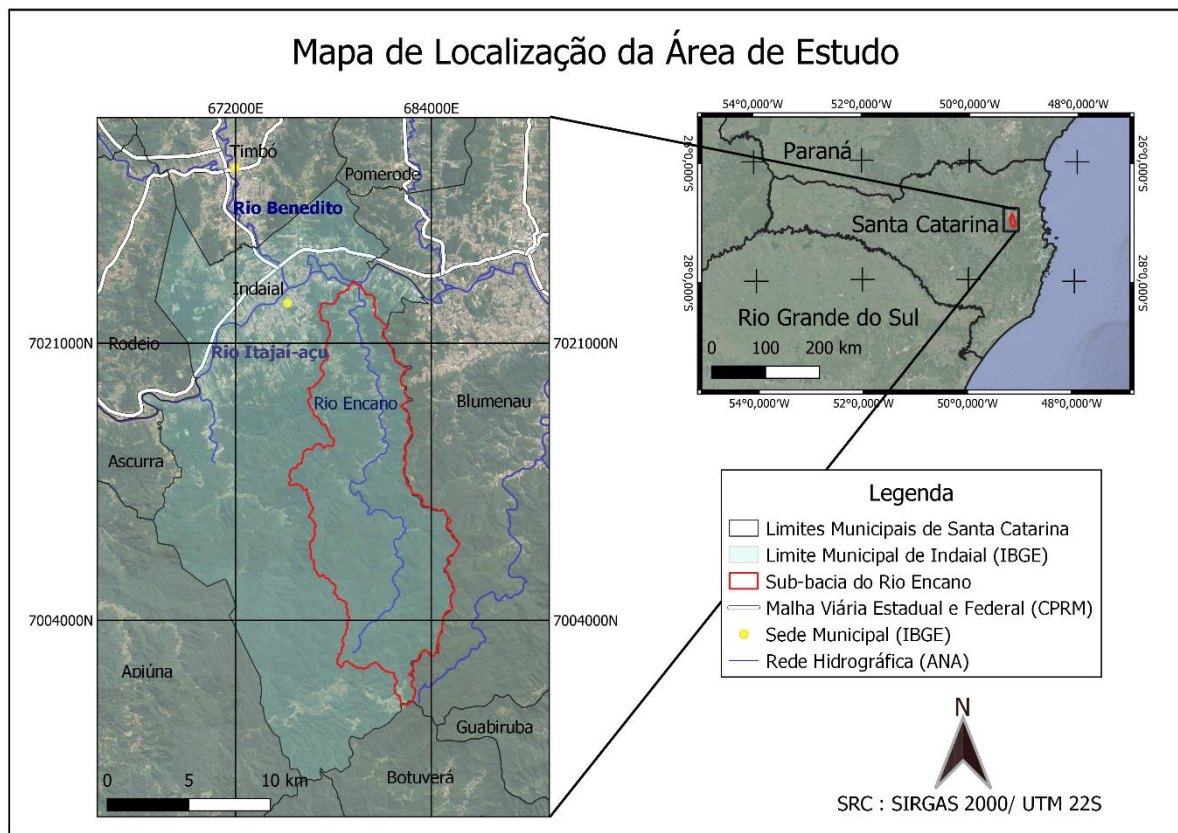


Figura 1- Localização da área de estudo, no município de Indaial/SC.

2.2 CARACTERÍSTICAS FISIOGRAFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ-AÇU.

A área de estudo está inserida na Bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu (Figura 3), localizada na vertente do litoral na Bacia do Trecho Atlântico Sul. A bacia do Rio Itajaí-Açu possui cerca de 15.089 km² e um perímetro de 1.222 km, abrangendo área total ou parcial de 60 municípios do estado de Santa Catarina. Além disso, apresenta amplitude altimétrica de aproximadamente 1.741 m, com picos mais altos na porção oeste da bacia enquanto os locais mais baixos são observados próximos a foz do Rio Itajaí-Açu, na porção litorânea. A altitude média da bacia é de 512 m, tendo metade da sua área acima da cota de 546 m (Figura 2). Referente a declividade do terreno, a bacia apresenta valores variando entre 0° e 62° e média de 11° (SANTA CATARINA, 2017).

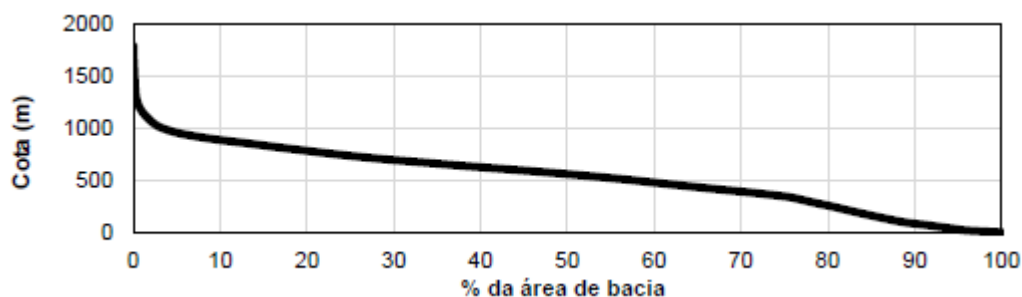


Figura 2 - Gráfico mostrando a curva hipsométrica da Bacia do Rio Itajaí-Açu. Fonte: Santa Catarina, 2017.

Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (2017), em geral, esta é uma região propensa a ocorrência de enchentes. Além de ser uma região que apresenta o relevo montanhoso, forte ondulado a ondulado, seu formato em vale também contribui para a ocorrência de enchentes deflagrado por precipitação intensa.

O Rio Itajaí-Açu é o principal rio da bacia (Figura 3), formado pela confluência dos rios Itajaí do Sul e Itajaí do Oeste, no município de Rio do Sul. As principais nascentes da área encontram-se na Serra do Espigão, próximas ao município de Rio do Campo. No médio vale, o Rio Itajaí-Açu tem como afluentes o Rio Itajaí do Norte em Ibirama e o Rio Benedito em Indaial, e no baixo vale o Rio Luiz Alves em Ilhota e Rio Itajaí Mirim em Itajaí, seguindo para o Oceano Atlântico. (SANTA CATARINA, 2017; SANTA CATARINA, 2011).

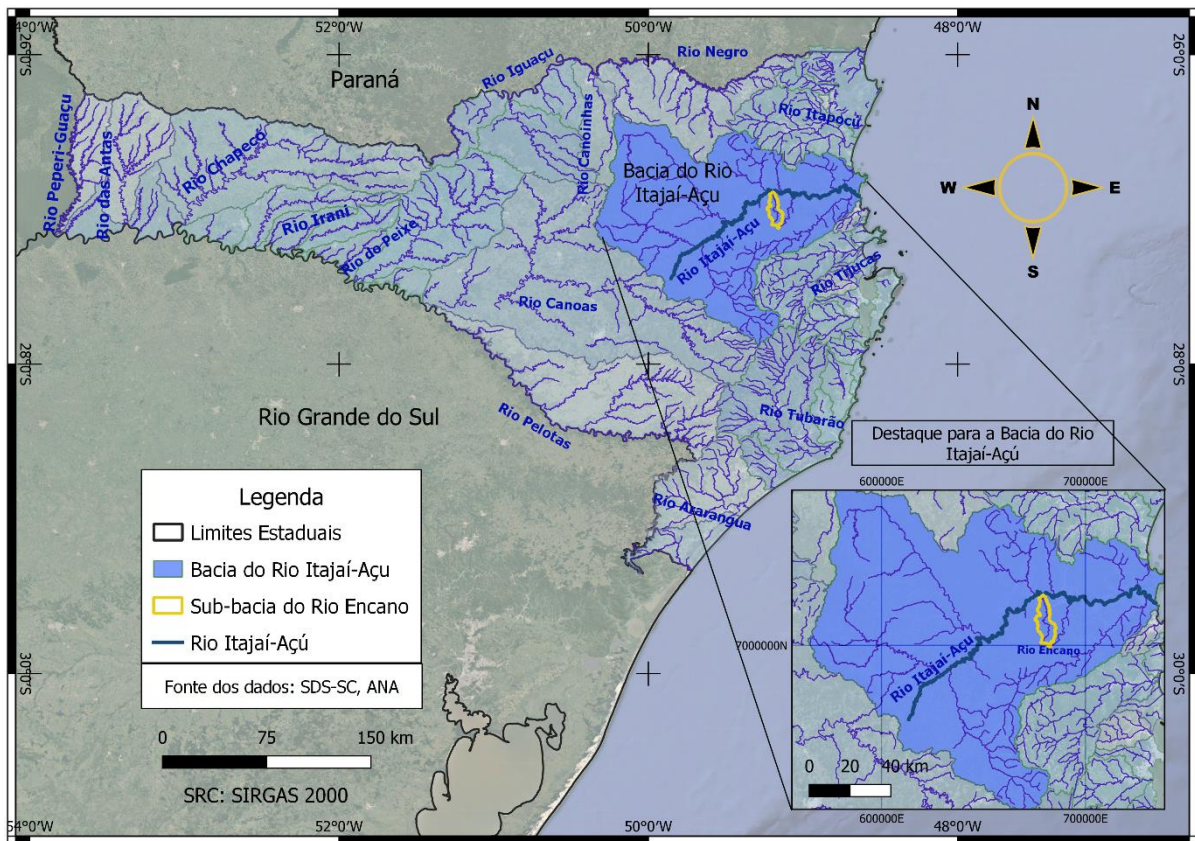


Figura 3– Mapa das bacias hidrográficas de Santa Catarina, com destaque para a Bacia do Rio Itajaí-Açu.

Conforme dados expostos no relatório do Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina (PANDOLFO *et al.*, 2002), a região do Vale do Itajaí apresenta dois tipos climáticos distintos segundo a classificação de Köppen: o subtropical mesotérmico úmido com verões quentes (Cfa) e o subtropical mesotérmico úmido com verões amenos (Cfb).

O primeiro possui temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) com geadas pouco frequentes, e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com tendência de concentração das chuvas, contudo sem estação seca definida. Já o segundo apresenta temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), e verões frescos com temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida (PANDOLFO *et al.*, 2002). O clima Cfa, no qual se encontra a sub-bacia do Rio Encano, ocupa quase toda a área de estudo, enquanto o Cfb ocupa a porção norte-nordeste. A região também sofre maior influência da Massa Tropical Atlântica e a e Massa Polar Atlântica (MARCUIZZO *et al.*, 2011).

Segundo informações retiradas do Atlas de Santa Catarina (1986) e Silva, Galatto e Camassola (2017) as precipitações pluviométricas anuais no município de Indaial estão entre 1600 e 1800 mm, com média de 120 dias de chuvas ao ano.

2.3 GEOLOGIA

A região estudada encontra-se na porção meridional da Província Mantiqueira, que, conforme Almeida *et al.* (1977), é uma unidade tectônica paralela à costa atlântica do sudeste do Brasil, delineando uma faixa de direção NE-SW, com mais de 3000 km de comprimento, que se estende do paralelo 15° S até o Uruguai. A Província Mantiqueira desenvolveu-se durante a Orogenia Neoproterozóica Brasileiro-Pan Africana a qual resultou na amalgamação do Paleocontinente Gondwana Ocidental. A Província é dividida em 3 segmentos: Setentrional, correspondente ao Orógeno Araçuaí; Central, composto pela porção sul do Orógeno Brasília e os orógenos Ribeira e Apiaí; e Meridional, que corresponde ao Orógeno Dom Feliciano (HEILBRON *et al.*, 2004).

O Orógeno Dom Feliciano, definido por Fragoso César (1980) como Cinturão Dom Feliciano (Figura 4), representa a porção mais ao sul da Província Mantiqueira, e estende-se desde o norte de Santa Catarina até o Uruguai (Basei *et al.*, 2000). Em Santa Catarina, o cinturão é limitado ao norte pelo contato com o Terreno Luís Alves, a oeste e sul com as rochas da Bacia do Paraná e a leste com o Oceano Atlântico.

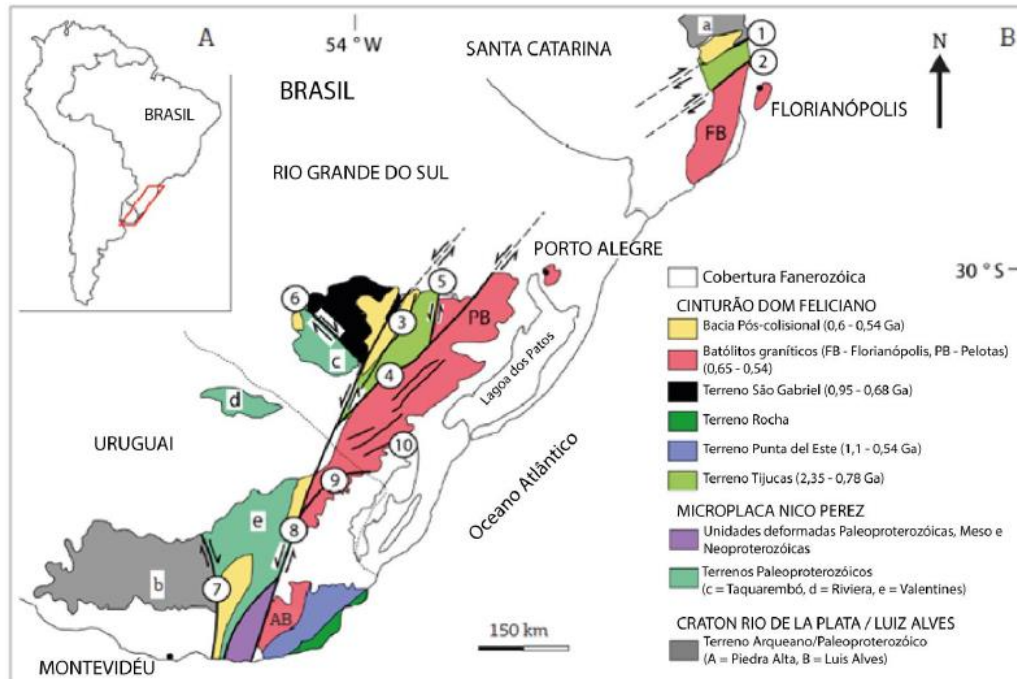


Figura 4 - Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano (Brasil – Uruguai). Zonas de Cisalhamento dúcteis: (1) Itajaí-Perimbó, (2) Major Gercino, (3) Caçapava do Sul, (4) Dorsal de Canguçu, (5) Passo do Marinheiro, (6) Ibaré, (7) Sarandí del Yí, (8) Sierra Ballena, (9) Cerro Amaro, (10) Arroio Grande. Extraído de Phillip *et al.* (2016).

As rochas do embasamento que ocorrem no estado de Santa Catarina são denominadas de Escudo Catarinense. Conforme Basei (1985) o Escudo Catarinense pode ser subdividido em três domínios tectônicos distintos (Figura 5): os domínios externo, central e interno. Os domínios são separados pelas zonas de cisalhamento Itajaí-Perimbó e Major Gercino. A área de estudo encontra-se boa parte no domínio externo e uma pequena parte no domínio central do Escudo Catarinense.

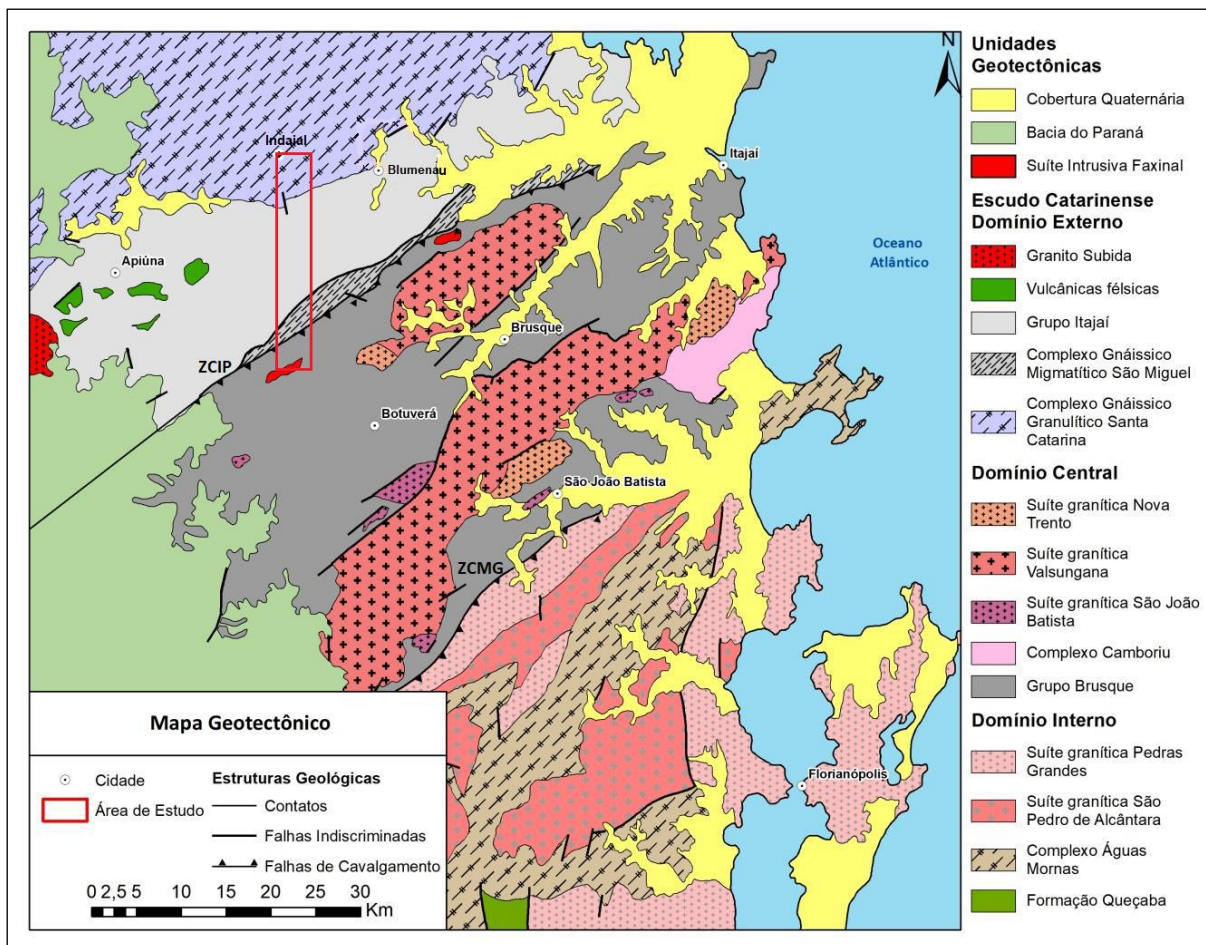


Figura 5– Contexto geotectônico da região da área de estudo. Fonte: Basei *et al.* 2011.

O Domínio Externo abrange as unidades paleoproterozóicas da Microplaca Luis Alves, representada pelo Complexo Granulítico de Santa Catarina (CGSC), unidade do Complexo Gnáissico Migmatítico São Miguel (CGSM), e rochas neoproterozóicas da Bacia do Itajaí. O Domínio Central é composto pelas rochas metavulcano-sedimentares do Complexo Metamórfico Brusque (CMB), pelo Complexo Camboriú e granitóides associados (Basei *et al.*, 2011). No Domínio Interno ocorrem as suítes graníticas Pedras Grandes e São Pedro de Alcântara, além de rochas metamórficas da Formação Queçaba e ortognaisses do Complexo Águas Mornas.

A área de estudo está situada entre os domínios da Microplaca Luis Alves e do Cinturão Dom Feliciano (BASEI *et al.*, 1992, CASTRO *et al.*, 2003 e BASEI *et al.*, 2011). O domínio da Microplaca Luis Alves é representado pelo Complexo Granulítico de Santa Catarina, enquanto o Cinturão Dom Feliciano pelo Domínio *Foreland* (Bacia do Itajaí) e Supracrustal (CMB e CGSM) e granitóides (Batólito Florianópolis) (CASTRO *et al.*, 2003).

A área de estudo ainda apresenta em menores dimensões intrusões graníticas representadas pela Suíte Faxinal (CALDASSO *et al.*, 1988; WILDNER *et al.*, 2014).

Neste trabalho será abordado a divisão das unidades litoestratigráficas segundo Wildner *et al.* (2014), sendo as mais relevantes para o estudo em questão as do Complexo Granulítico de Santa Catarina, Complexo Ribeirão da Prata, Complexo Metamórfico Brusque e da Bacia do Itajaí, como exposto na Figura 6.

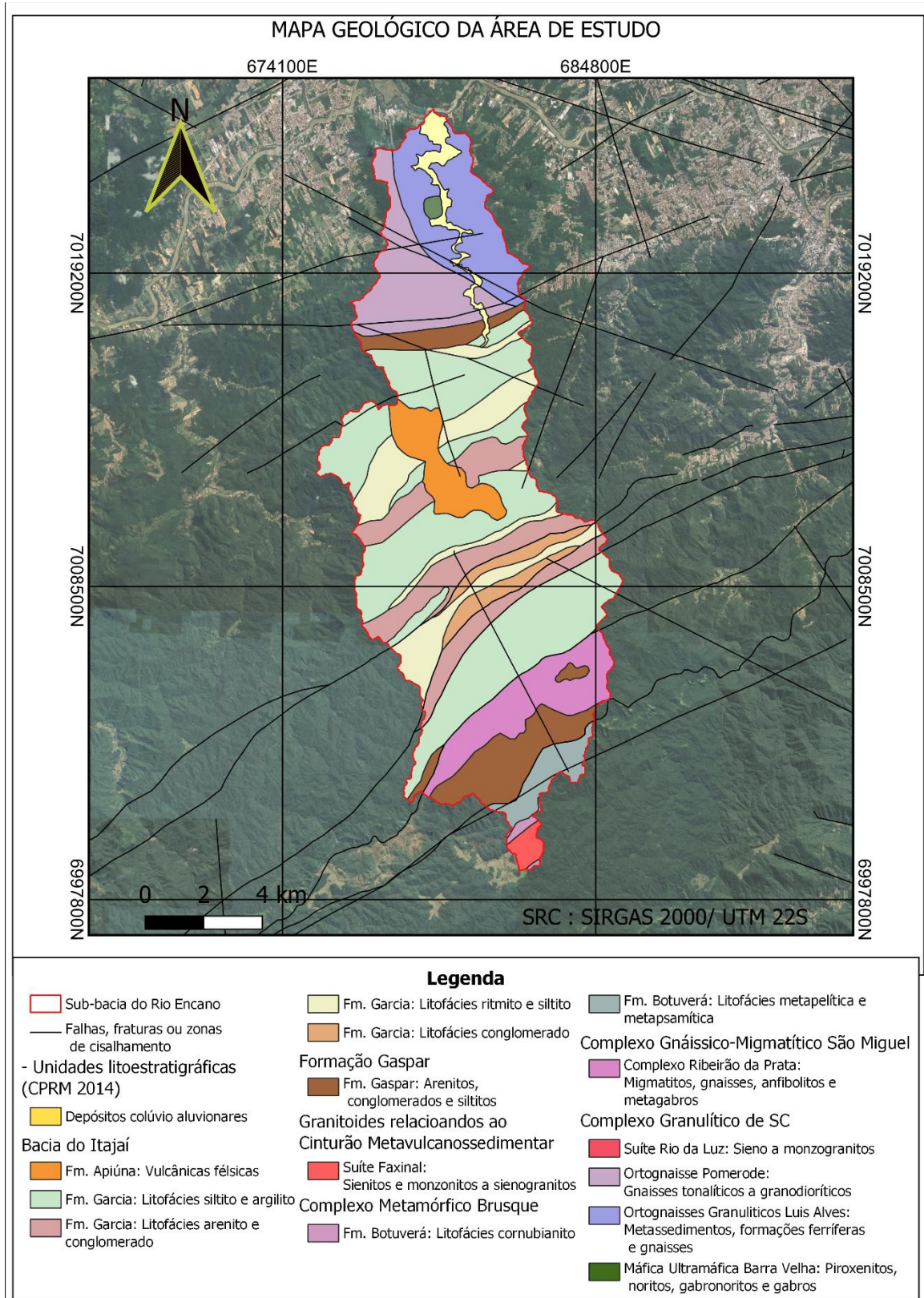


Figura 6 – Mapa geológico da área da sub-bacia do Rio Encano. Fonte: Wildner et. al., 2014.

2.3.1 Geologia Estrutural Regional

A área de estudo possui uma descontinuidade crustal de orientação NW-SE, denominada de Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP) (Silva, 1991) que se estende por mais de 60 km no Escudo Catarinense e limita o domínio central e o domínio externo (BASEI, 1985; HADLICH, ALTHOFF, RONCHI e DUBOIS, 2017). A ZCIP teve grande influência na evolução tectônica do Cinturão Dom Feliciano, e posteriormente sua ativação afetou as rochas da Bacia do Paraná (ROSTIROLLA *et al.*, 2003).

Segundo Silva (1991) e Rostirolla *et al.* (1992) a ZCIP é uma zona de cisalhamento de caráter rúptil com deslocamento lateral, que teria sido gerado pelo movimento de falhamento inverso seguido de uma evolução direcional destrá.

Biondi *et al.* (1992), ao estudar as mineralizações associadas a milonitos e cataclastos da ZCIP descreve a falha como uma estrutura complexa, com características de zona de cisalhamento dúctil reativada em condições rúpteis, mesclando-se movimentos reversos predominantes, deslocamentos transcorrentes destrógenos (E-W) e transcorrências sinistrais, orientadas N5-30E.

Em trabalho de Rostirolla *et al.* (2003) é constatado que a ZCIP se desenvolveu como uma falha de movimento lateral direito-inversa durante o Ciclo Brasileiro e foi reativada como uma falha de movimento lateral esquerdo ou localmente como falha oblíqua-normal durante o desenvolvimento da Bacia do Paraná no Paleozoico. A ZCIP apresenta a mesma orientação tanto no embasamento quanto na cobertura sedimentar, com o sistema de falhas variando de NE a NNW.

Phillipp *et al.* (2004) destacam a importância da ZCIP no alojamento dos granitos intrusivos do Complexo Metamórfico Brusque, paralelos a estas estruturas, além de citarem a zona de cisalhamento como sendo de alta deformação, foliação subvertical e movimentação transcorrente destrá. Schroeder (2006) descreve rochas de falha ao longo da ZCIP (milonitos, ultramilonitos e filonitos), que expressam o caráter rúptil-dúctil da deformação, apresentando uma foliação milonítica subvertical de orientação N45°E. Ronchi (2014) cita em seu trabalho que a estrutura da ZCIP indica inicialmente a atuação de falhas de cavalgamento (transporte de SE para NW), passando a funcionar como falha de rejeito direcional lateral-direito e posteriormente o eixo principal de esforço manteve-se em torno de N40W/horizontal.

Segundo Guadagnin *et al.* (2010), o Complexo Granulítico de Santa Catarina faz, em partes, limite com as rochas da Bacia do Itajaí através do Lineamento de Blumenau que seria

uma zona rúptil de transcorrência destal, situada em torno do paralelo 27, com orientação E-NE e extensão de cerca de 100 km (HARTMANN *et al.*, 1979).

Quanto às estruturas da Bacia do Itajaí, Silva e Dias (1981) destacam dois *trends* regionais de estrutura, de N20-30E e outro de direção N40-60W. Esta última estrutura é interpretada por alguns autores como falhas transcorrentes destrais (ROSTIROLLA *et al.*, 1999; SCHROEDER, 2006; GUADAGNIN *et al.*, 2010). Krebs *et al.* (1990) identificaram as estruturas mais recorrentes da Bacia do Itajaí, como: sistema transcorrente principal relacionado à ZCIP, com direção N50-60E; fraturas/falhas sintéticas esse de direção N35-45E; fraturas/falhas antitéticas (R') com direção N15-15W; fraturas de extensão (T) com direção N5-15E; fraturas simétricas de R (P) com direção N65-75E; fraturas simétricas de R' (X) de direção N45-55W.

Schroeder (2006) identificou que a principal estrutura da bacia, tem orientação N55-65E, com agrupamento de estruturas geológicas em WNW-ESE, ENE-WSW, E-W e NW. O autor ainda destaca a ocorrência de falhas normais, inversas e transcorrentes sinistrais e dextrais, orientadas, respectivamente a NE e NW.

2.3.2 Complexo Granulítico de Santa Catarina (CGSC)

Descrito por Hartmann *et al.* (1979), o Complexo Granulítico de Santa Catarina, constitui o núcleo Neoarqueano a Paleoproterozóico, sendo a unidade geotectônica mais antiga do Escudo Catarinense. O CGSC é constituído principalmente por uma associação de rochas gnáissicas de origem orto e paraderivada, onde predominam os ortognaisses quartzo-feldspáticos. Na fração de rochas com protólitos sedimentares ocorre uma diversidade de gnaisses peraluminosos, kinzigitos, rochas calcissilicatadas, formações ferríferas bandadas e fuchsita quartzitos. Os paragnaisses estão justapostos a ortognaisses enderbíticos, charno-enderbíticos e trondhjemíticos, e intrudidos por rochas granodioríticas a sienograníticas (HARTMANN *et al.*, 1979).

De acordo com Hartmann *et al.* (2000), zircões de uma fração trondhjemítica associada a ortogranulitos foram datados pelo método U-Pb (SHIRIMP) fornecendo idades arqueanas de 2717 ± 16 Ma para o protólito magmático.

Conforme o mapeamento geológico da Folha Joinville (IGLESIAS *et al.*, 2011), o CGSC foi subdividido em 7 unidades, dentre elas, 4 estão presentes na área de estudo, como pode ser observado na Figura 4. A seguir serão detalhadas as unidades correspondentes à área estudada.

A unidade **Máfica-Ultramáfica Barra Velha** configura rochas máficas e ultramáficas isótropas a foliadas que ocorrem como lentes e enclaves nos gnaisses granulíticos e também na forma de corpos máficos representados por blocos e matacões nas encostas de morros, sem continuidade superficial entre os afloramentos. Essas rochas são constituídas por metapiroxenitos, metanoritos, metagabronoritos e metagabros. Os gnaisses máficos, associados a essa unidade são metanoritos, metagabronoritos e metagabros.

As relações de contato com os gnaisses granulíticos circundantes são difusas a gradacionais, sugerindo um variado grau de interação entre estas rochas. A foliação das rochas máficas-ultramáficas, quando presente, é concordante com as direções estruturais (foliação e bandamento) dos gnaisses granulíticos regionais. Além disso, a presença de enclaves de rochas máficas-ultramáficas nos gnaisses granulíticos, de xenólitos de gnaisses foliados em rochas máficas-ultramáficas e a presença de feições compatíveis com diques rompidos, indicam uma evolução complexa para esta unidade.

A unidade **Gnaiss Granulítico Luis Alves** corresponde ao núcleo gnáissico-granulítico indiferenciado do CGSC. Esta unidade é constituída principalmente por gnaisses enderbíticos, charno-enderbíticos e trondhjemíticos com enclaves máficos-ultramáficos de metagabronoritos, metapiroxenitos e metahornblenditos, além de ocorrerem também gnaisses granulíticos básicos, gnaisses anfibolíticos, anfibolitos e lentes de gnaisses kinzigíticos, calcissilicáticas e quartzitos (IGLESIAS *et al.*, 2011).

Esta unidade contém rochas Arqueanas datadas de 2.716, 2.680 e 2.170 Ma pelo método U-Pb (WILDNER *et al.*, 2014). Nela, estão inclusos gnaisses com bandamento milimétrico gerado por segregação de minerais máficos e félsicos em gnaisses intermediários. (IGLESIAS *et al.*, 2011).

A unidade **Ortognaisse Pomerode** é definida por Fornari (1998) como “Suíte Granítica Pomerode”, com uma quantidade expressiva de rochas graníticas a tonalíticas em uma área de aproximadamente 250 km², nas imediações de Pomerode e Indaial. Segundo o autor, as rochas graníticas possuem coloração rósea, e as rochas tonalíticas coloração cinza escuro. Fornari (1998) ainda ressalta que a suíte seria intrusiva nas rochas granulíticas máficas por conta da presença de enclaves de metagabros nas regiões de contato.

Conforme Iglesias *et al.* (2011) as rochas dessa unidade são formadas majoritariamente por gnaisses dioríticos, tonalíticos a granodioríticos e graníticos, foliados a bandados, com um bandamento decimétrico a métrico ou ausente. Além de apresentarem coloração cinza escuro a cinza claro, granulação média a grossa, e localmente porfiroclastos de feldspatos alcalinos (ortoclásio) e/ou plagioclásios, de coloração caramelo marcando a foliação. As rochas da unidade ainda apresentam enclaves máficos (metagabros), gnaisses e hornblenditos de granulação grossa com ou sem plagioclásios.

Dois zircões de amostras do Ortognaisse Pomerode foram datados pelo método U-Pb (SHRIMP) e apresentaram idades de 2.226 ± 5 Ma e $2.209,7 \pm 4,2$ Ma (IGLESIAS *et al.*, 2011).

Por fim, a unidade **Suíte Rio da Luz** é a última integrante do CGSC presente na área de estudo, nela ocorrem corpos de sienogranitos e monzogranitos de coloração vermelha, apresentam foliação milonítica, granulação média a grossa e uma quantidade de máficos restrita (IGLESIAS *et al.*, 2011). Essas rochas parecem ser intrusivas nos Ortognaisses Pomerode e podem ser responsáveis pela feldspatização da rocha encaixante a partir de fraturas e veios com ocorrência de epidoto nos ortognaisses desta unidade (IGLESIAS *et al.*, 2011).

2.3.3 Complexo Ribeirão da Prata

O Complexo Ribeirão da Prata (WILDNER *et al.*, 2014) é constituído por corpos metamórfico como migmatitos, gnaisses, anfibolitos e metagabros, bem como granitóides róseos deformados. Segundo Basei (1985), esta unidade (Faixa Ribeirão da Prata para o autor) faz parte do Complexo São Miguel e resultaria de um retrabalhamento das litologias do Complexo Granulítico na borda sul do Cráton do Rio de La Plata. O seu desenvolvimento, ocorrido no início do Ciclo Brasileiro, estaria relacionado com grandes falhas inversas, reativadas no final da orogênese, posicionando as rochas do Complexo Metamórfico Brusque sobre as litologias do Complexo São Miguel que por sua vez, estão sobre os sedimentos da Bacia do Itajaí.

2.3.4 Complexo Metamórfico Brusque (CMB)

O Complexo Metamórfico Brusque (SILVA, 1991) está situado entre a zona de cisalhamento Major Gercino a sul e a zona de cisalhamento Itajaí-Perimbó a norte.

O CMB teve inúmeras interpretações distintas, como uma associação de rochas formadas em margem continental passiva (BASEI, 1985), ou relacionada a depósitos plataformais e de leques submarinos (Caldasso *et al.* 1995), ou ainda relacionada a um ambiente de bacia do tipo *rift* (SILVA, 1991).

O CMB constitui uma sequência supracrustal neoproterozóica metavulcano-sedimentar formada por metapelitos, filitos e xistos micáceos intercalados com semi-pelitos, quartzitos, rochas calcisilicáticas, mármore, xistos magnesianos, tendo algumas rochas metavulcânicas félsicas, máficas e ultramáficas, metamorfisadas em condições de fácies xisto verde inferior a médio (BASEI 1985, FLORISBAL, 2011; IGLESIAS *et al.*, 2011).

Segundo Philipp *et al.* (2004) o CMB pode ser subdividido em cinco conjuntos litológicos com base nos seus protólitos dominantes: Subunidade Clástica, Subunidade Química, Subunidade Clástico-Química, Subunidade Metavulcânica Básica e a Subunidade Magnesiânica. Conforme classificado pelo autor, a subunidade Clástica compreende três conjuntos litológicos distintos, os metapelitos-metarenitos, quartzitos e metaconglomerados.

A subunidade Clástico-Química contém rochas de composição margosa, do tipo aluminosas e alumino-silicosas. O primeiro tipo compreende xistos de cor castanha escura, ricos em anfibólios e biotita. Já o segundo tipo é composto por rochas cálciosilicáticas de estrutura bandada a raramente xistosa (PHILIPP *et al.*, 2004).

As rochas metassedimentares químicas da Subunidade Química constituem mármore calcítico a dolomítico, com raras bandas de metapelitos e quartzitos. Na subunidade Metavulcânica Básica são observados metabasitos, que são anfibólios xistos de cor verde escura a preta (PHILIPP *et al.*, 2004).

Por fim a Subunidade Magnesiânica é composta por rochas ultramáficas dispostas em corpos tabulares, estas rochas são caracterizadas como tremolita xistos, com ocorrência subordinada de tremolita actinolita xistos. Nos tremolita xistos ocorre também clinocloro, talco e magnetita, enquanto nas actinolita xistos ocorrem subordinadamente penina e minerais opacos (PHILIPP *et al.*, 2004).

O autor ainda ressalta que ocorreram diversas intrusões graníticas no CMB a partir de dois eventos de magmatismo granítico. O primeiro evento associado à evolução

metamórfica do complexo, caracterizado por corpos leucosienograníticos com formas tabulares e posicionado de acordo com a evolução da xistosidade principal, que marca a segunda fase de metamorfismo regional orogênico. O segundo magmatismo granítico é mais tardio, com uma colocação relacionada à evolução das zonas de cisalhamento dúcteis transcorrentes.

Na região ocorrem os granitos Valsungana e Serra dos Macacos, que estão associados com a evolução das zonas de cisalhamento Major Gercino e Itajaí-Perimbó. O posicionamento destas unidades é responsável pela formação de rochas cornubianíticas, apresentando auréolas de contato que podem ser observadas nas proximidades dos plútons graníticos (PHILIPP *et al.*, 2004). Neste evento termal foram gerados cornubianitos em condições metamórficas entre as fácies albita-epidoto cornubianito e a fácies piroxênio cornubianito.

As rochas cornubianíticas ocorrem também relacionadas ao metamorfismo de contato entre litologias do Complexo Metamórfico Brusque e o Granito Guabiruba e granitóides da Suíte Faxinal, com um metamorfismo variante entre clorita e anfibólio cornubianitos (WILDNER *et al.*, 2014).

Na área de estudo ocorrem também rochas da Subunidade Clástica (PHILIPP *et al.*, 2004) ou as rochas da Litofácies Metapelítica (IGLESIAS *et al.*, 2011). Estas rochas são constituídas por sericita xistos de coloração cinza prateado, de granulação fina, onde pode ocorrer grafita. Segundo Iglesias *et al.* (2011) os sericita xistos possuem pouca quantidade de quartzo e predominância sobre os clorita-sericita-quartzo xistos, onde ocorrem bandas subordinadas de quartzitos micáceos.

2.3.5 Bacia do Itajaí

A Bacia do Itajaí, de orientação N60E é descrita como uma bacia sedimentar periférica de ante-país com espesso pacote de rochas sedimentares depositadas no final do neoproterozóico (600 e 560 Ma) e com uma contribuição vulcânica subordinada. A unidade é limitada por falhas e faz contato deposicional à norte com as rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina e a sul contato tectônico com o Complexo Metamórfico Brusque representado por falhamento inverso com a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (BASEI *et al.*, 1985; BASEI *et al.*, 2011; ROSTIROLLA *et al.*, 1992; ROSTIROLLA *et al.*, 1999).

Historicamente, os estudos da Bacia do Itajaí iniciaram com Dutra (1926), o qual denominou as rochas da bacia como Série Itajaí. Maack (1947) dividiu a Série Itajaí em duas unidades: Formação Ibirama na base (composta por xistos, ardósias, lentes de conglomerado e quartzitos), e Formação Gaspar no topo (composta por conglomerados, arenitos e folhelhos). Posteriormente, Salamuni *et al.* (1961) reclassificaram a Série Itajaí de forma distinta, com a Formação Garcia na base (representada por arenitos, folhelhos siltico-arenosos intercalados com arenitos conglomeráticos, conglomerados e rochas vulcânicas) e a Formação Gaspar no topo representada por conglomerados apresentando arenitos arcóseos subordinados.

Schulz Jr *et al.* (1970), Kaul (1976) e Silva e Dias (1981) passaram a chamar as rochas da bacia como Bacia do Itajaí. Silva e Dias (1981) ainda propuseram a inversão das unidades estratigráficas, com a Formação Gaspar (composta por arenitos arcóseos, arenitos bordô finos, com intercalação de tufos ácidos) situada na base, e a Formação Campo Alegre (composta por siltitos e arenitos com rochas vulcânicas ácidas subordinadas).

Posteriormente em trabalho de Basei *et al.* (1985) as rochas da Bacia do Itajaí são subdivididas em Unidade Arenítica Inferior na base, equivalente à Formação Gaspar, como descrito em Silva e Dias (1981) e em Unidade Siltica Superior no topo. A unidade basal pode ser classificada como sendo composta por arenitos bordôs maciços com lentes de conglomerados e tufos vulcânicos associados, já a unidade de topo por fácies mais finas, com alternância de siltitos e arenitos na base e de siltitos e argilitos no topo.

A partir de trabalhos como Krebs *et al.* (1988), Appi e Cruz (1990), Rostirolla *et al.* (1992; 1999) técnicas de estratigrafia de sequência passaram a ser aplicadas com base nos ambientes deposicionais. Rostirolla *et al.*, (1992) passa a subdividir o Bacia do Itajaí em quatro associações de fácies distintas, classificadas da base para o topo como A, B, C e D. A Associação de Fácies A corresponde a uma sequência inferior continental, marcada pela sedimentação continental que grada para uma plataforma rasa em direção ao topo. A Associação de Fácies B corresponde à um sistema de fácies turbidíticos, já a Associação de Fácies C é representada por siltitos e folhelhos depositados em ambiente distal de leque, em quanto a Associação de Fácies D seria correspondente a depósitos um pouco mais grossos em relação ao C, de um ambiente de leque deltaico propriamente dito (ROSTIROLLA *et al.*, 1999).

Guadagnin *et al.* (2010) ainda descreveram em seu trabalho que as rochas da Bacia do Itajaí são intrudidas pelo Riolito Apiúna (567 ± 14 Ma) em forma de três *stocks*, diques e *necks*, além

de serem intrudidas por rochas do Granito Subida (561 ± 42 Ma), ambos datados pelo método convencional de U-Pb em zircão.

Iglesias *et al.* (2011) dividiram a Bacia do Itajaí da base para o topo em Formação Gaspar (arenitos, conglomerados e tufos finos associados a siltitos), Formação Garcia (siltitos, arenitos e conglomerados) e Formação Apiúna (rochas vulcânicas riolíticas).

Basei *et al.* (2011) apresentaram um mapa geológico da Bacia do Itajaí com base na síntese de informações coletadas ao longo dos anos, em trabalhos realizados na área por diversos autores (Figura 7). Os autores ainda propuseram uma classificação das rochas que compõem a Bacia do Itajaí em cinco unidades, baseado em suas relações litoestratigráficas e nas deformações que afetaram a bacia.

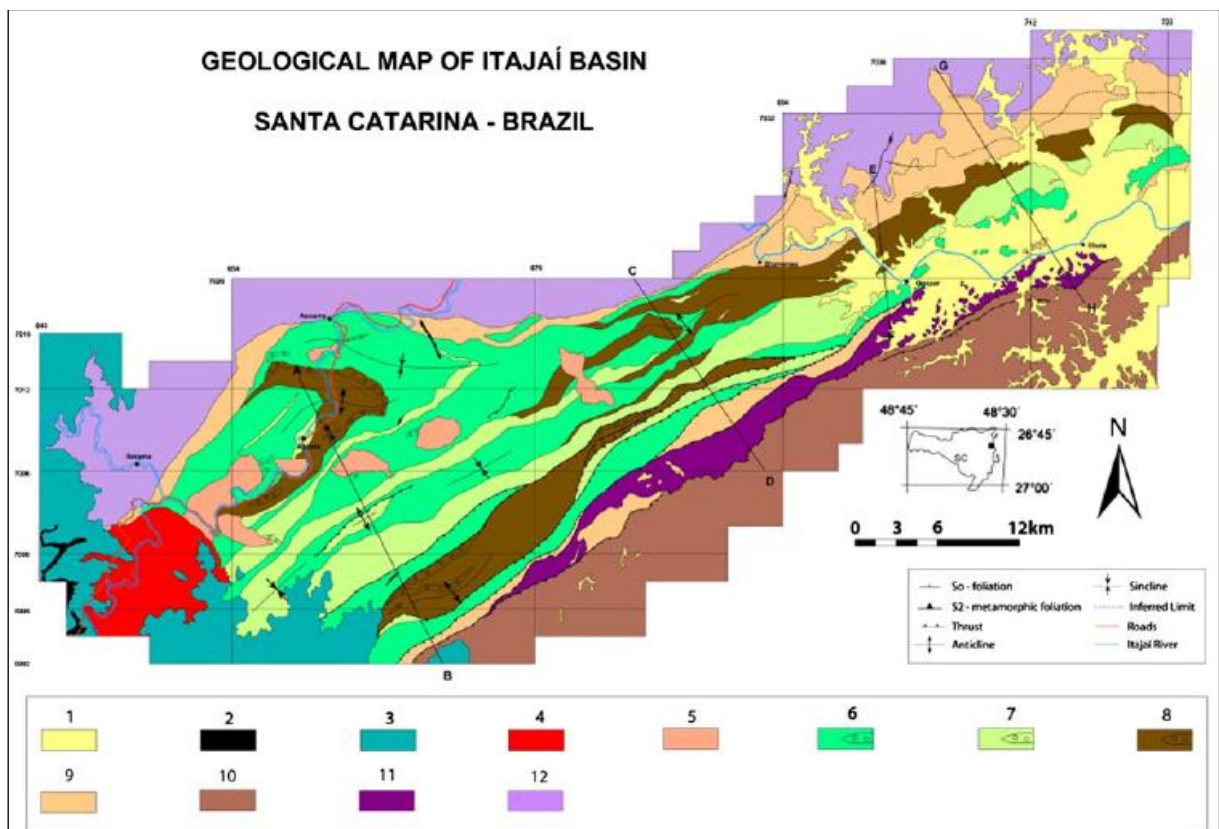


Figura 7 – Mapa geológico da Bacia do Itajaí: 1 Quaternário; 2 Sill básico; 3 Bacia do Paraná; 4 Granito Subida; 5 Fm. Apiúna; 6 Fm. Ribeirão do Bode; 7 Fm. Ribeirão Neisse; 8 Fm. Ribeirão do Carvalho; 9 Fm. Baú; 10 Grupo Brusque; 11 Complexo São Miguel; 12 Complexo Granulítico de Santa Catarina. Fonte: Basei *et al.*, (2011).

A unidade litoestratigráfica continental base de Basei *et al.* (2011) é chamada de **Formação Baú**. A unidade é composta por lentes de conglomerados polimíticos clasto-suportados com matriz arcósea que se estendem por centenas de metros. Os clastos variam

muito de tamanho e tem como arcabouço predominantemente gnaisses, granitos, veios de quartzo, quartzitos e milonitos, podendo encontrar também clastos de mica-xistos e fragmentos de rochas da própria bacia. No topo da unidade são encontrados normalmente arenitos arcóseos micáceos com tufos vulcânicos ocorrendo intercalados com os níveis arenosos. As estruturas sedimentares primárias são imbricações de clastos e estratificação cruzada sigmoidal, mas frequentemente os conglomerados são organizados caoticamente. Os níveis arenosos formam camadas lenticulares que variam de 0.2 a 1.2 metros e mostram gradações normais, estratificações plano paralelas, sigmoidais, cruzadas tabulares, cruzadas tangenciais na base e de baixo ângulo. Segundo os autores a deposição dessa unidade está atribuída a um sistema de leques aluviais deltaicos com um nível conglomerático basal representando uma fácies cascalhosa de planície deltaica e o topo por níveis arenosos representando uma fácies deltaica proximal.

Acima da Formação Baú ocorrem as rochas sedimentares ritmíticas da **Formação Ribeirão Carvalho**, resultado da contribuição turbidítica proximal. A unidade pode ser dividida em dois tipos de rocha, o primeiro por ritmitos tabulares compostos por arenitos médios a finos intercalados com folhelhos, siltitos e arenitos médios. O segundo tipo representado por ritmitos acanalados, compostos predominantemente por arenitos gradacionais, médios a grossos, e finas camadas de arenitos intercaladas com folhelhos (BASEI *et al.*, 2011).

Os ritmitos estão em contato gradacional com a **Formação Ribeirão Neisse**. Essa formação é composta por arenitos arcóseos de coloração cinza, imaturos, mal-selecionados, finos a médios apresentando estratificação plano-paralela, cruzadas e cruzadas acanaladas e *climbing-ripples* e *slumps* (BASEI *et al.*, 2011).

A **Formação Ribeirão do Bode** representa a unidade sedimentar mais recente da Bacia do Itajaí. A unidade é constituída por siltitos laminados alternados com camadas silto-argilosas contendo níveis silto-arenosos. Ocorrem também em menores volumes níveis de siltitos maciços e intercalação de conglomerados polimíticos com clastos de rochas vulcânicas ácidas. As principais estruturas da unidade são laminações plano-paralelas, *wavy*, *linsen*, estruturas em *slump* e camadas gradacionais (BASEI *et al.*, 2011).

Completando a coluna litoestratigráfica, ocorrem também rochas vulcânicas félsicas de composição riolítica da **Formação Apiúna**, que cortam as rochas das outras unidades litoestratigráficas. Por fim o leucosienogranito **Subida** representa a última atividade magmática a afetar os sedimentos da Bacia do Itajaí (BASEI *et al.*, 2011).

Segundo Basei *et al.*, (2011), a Bacia do Itajaí tem como principal fonte de material de preenchimento da unidade marinha superior advinda da erosão da sequência metavulcano-sedimentar do Complexo Metamórfico Brusque e do Batólito Florianópolis, enquanto a sequência continental basal tem origem relacionada ao Complexo Granulítico de Santa Catarina.

Neste trabalho foi adotada a classificação utilizada em Wildner *et al.* (2014) e Iglesias *et al.* (2011), na qual a o Bacia do Itajaí é dividido em Formação Gaspar (Formação Baú de BASEI *et al.*, 2011), Formação Garcia (com quatro litofácies distintas) e Formação Apiúna. Como pode ser observado na Figura 6, a área de estudo abrange as três formações. A seguir as unidades serão descritas brevemente com base na mesma classificação:

- **Formação Gaspar:** constituída por arenitos e conglomerados com tufos finos associados e siltitos que ocorrem de forma subordinada. O arenito apresenta uma coloração bordô, granulação fina a média e composição arcoseana com baixo grau de seleção, apresenta também estratificação cruzada acanalada de baixo ângulo e pequeno porte. Muscovita detrítica é encontrada nos arenitos. Intercalam-se, no arenito arcoseano, níveis importantes de conglomerados polimíticos com matriz arcoseana.
- **Formação Garcia Litofácies silito e arenito fino a médio, rítmico:** Formada pela intercalação de lamitos, siltitos e arenitos finos a médios (eventualmente grossos). Os arenitos podem apresentar estratificação plano-paralela ou estrutura maciça, em camadas tabulares com granodecrescência ascendente.
- **Formação Garcia Litofácies conglomerado:** Caracterizada pela ocorrência dominante de conglomerado polimítico com matriz mal selecionada, de composição feldspática, podendo ser clasto-sustentado ou matriz-sustentado, com estrutura maciça a caótica. Apresenta clastos centimétricos a decimétricos, angulosos a sub-angulosos;
- **Formação Garcia Litofácies arenito com conglomerados intercalados:** Caracterizada pela ocorrência de arenitos de coloração vermelho tijolo a violáceo, mal selecionados, com estratificações cruzada acanalada e cruzada cavalgante. Apresenta intercalações de camadas conglomeráticas estreitas e lâminas de siltitos maciços;
- **Formação Garcia Litofácies siltitos e argilitos:** Composta por camadas espessas de siltitos, intercaladas com níveis de argilitos de coloração avermelhada, com estrutura maciça, laminação plano-paralela e ainda estrutura *wavy linsen*. Ocasionalmente podem ocorrer conglomerados finos no topo das camadas de siltitos, em contato erosivo.
- **Formação Apiúna:** Formada predominantemente por rochas vulcânicas ácidas, riolíticas, de coloração rosa avermelhada, leucocráticas a hololeucocráticas, microporfíricas a porfíricas apresentando fenocristais de K-feldspato e quartzo. Ocorre o predomínio

de K-feldspato na matriz afanítica, que ainda apresenta quartzo intersticial e plagioclásios

A geologia estrutural da Bacia do Itajaí é marcada por duas fases distintas de dobramento com diferentes orientações axiais, que seriam responsáveis pelas principais estruturas tectônicas da bacia. Segundo Basei *et al.* (2011), a primeira fase (D1) foi a mais intensa, com direção preferencial E-W e NE-SW, paralela à elongação da bacia e à direção da Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP), estando relacionada ao cavalgamento do CMB sobre os sedimentos da bacia. O acamamento das rochas é predominantemente marcado por uma direção ENE-WSW, e mergulho de 15° a 40° SE. A segunda fase (D2), de menor intensidade, mas que gerou interferência nas estruturas D1, tem direção preferencial para N-S, marcada por dobras amplas e descontínuas com caimento levemente para S (BASEI *et al.*, 2011).

2.4 CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

Conforme dados extraídos do Banco de Informações Ambientais (BDiA) e o Mapa de Geomorfologia, Folha Joinville - SG.22-Z-B (IBGE, 2004), a área de estudo encontra-se no domínio morfoestrutural de Embasamentos em Estilos Complexos e na Unidade Geomorfológica Serras do Leste Catarinense (Figura 8). Esta unidade é caracterizada pela presença de serras com grande dissecação do relevo, que se acha, em parte, controlada estruturalmente, resultando em um modelado de dissecação diferencial com relevo caracterizado por vales profundos com encostas íngremes e sulcadas, separadas por cristas bem marcadas na paisagem.

Ao longo dos vales do rio Itajaí-Açu ocorrem morros isolados, de formato arredondado, em meio à planície aluvial. A presença de encostas íngremes e vales profundos na região favorece a atuação de processos erosivos e a ocorrência de movimentos gravitacional de massa. A área de estudo ainda abrange o domínio Depósitos Sedimentares Quaternários, subunidade Planícies Alúvio-coluvionares, que por sua vez é restrita às calhas do rio Itajaí-Açu e afluentes.

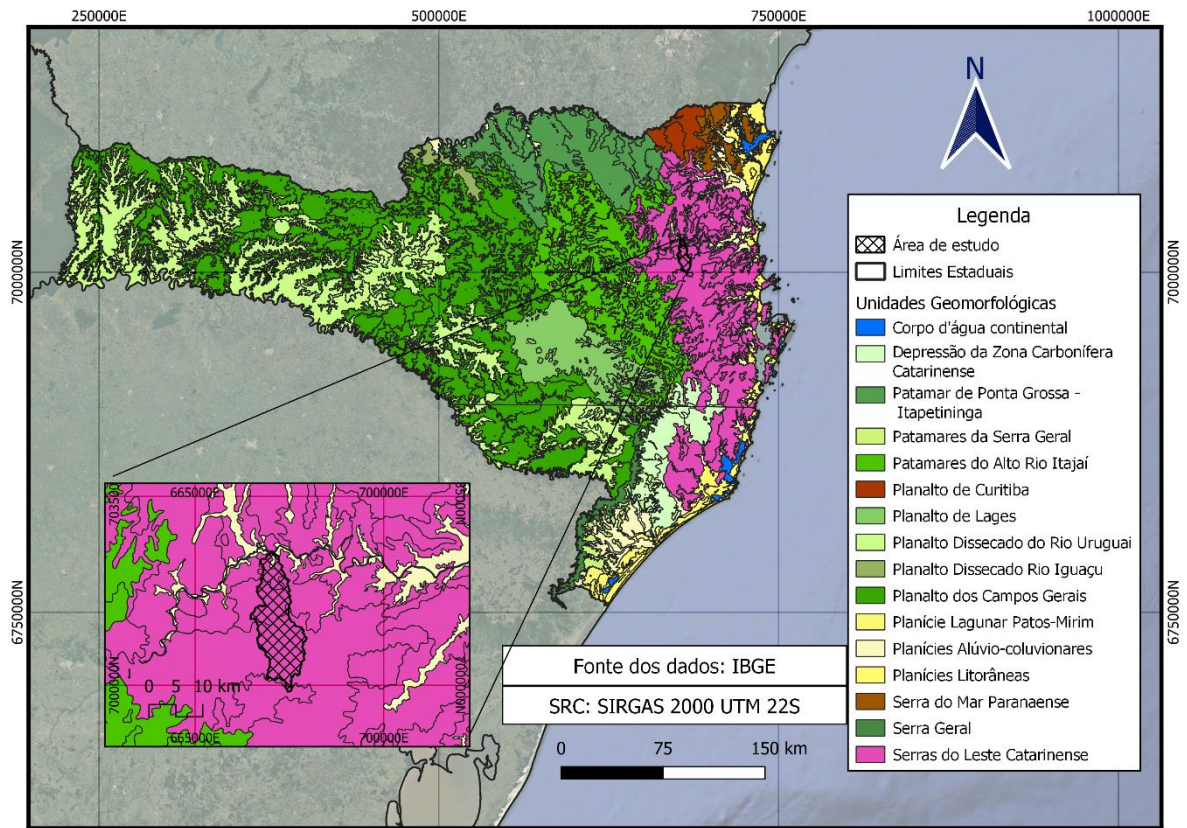


Figura 8 - Mapa do contexto geomorfológico do estado de Santa Catarina com destaque para a área de estudo.
Fonte: IBGE

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa (MGM) são processos naturais de remobilização dos materiais (solos, rochas e vegetação) que recobrem a superfície das vertentes ou encostas sob a ação direta da gravidade através de uma superfície de ruptura (KOBİYAMA, 2006; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008; TOMINAGA *et al.*, 2015).

Os movimentos de massa consistem em um importante processo que faz parte da modelagem do relevo e evolução geomorfológica. A contribuição de outros meios, como água e gelo, eventos de elevada precipitação ou atividades sísmicas como terremotos podem fornecer condições propícias para a diminuição da resistência dos materiais da vertente e indução do comportamento plástico e fluído do solo (KOBİYAMA, 2006; TOMINAGA *et al.*, 2015).

A classificação de MGM pode ser feita de diversas formas, uma vez que envolve uma variedade de materiais e processos. Em geral a classificação é feita associada a mecanismos específicos de ruptura em taludes. Uma proposta muito utilizada e bem aceita é a de Varnes (1978), baseada no tipo de movimento e no material transportado. De acordo com a classificação voltada para o território brasileiro de Augusto Filho (1992), existem quatro tipos básicos de MGM: os rastejos, escorregamentos, corridas e as quedas de blocos.

Destaca-se a importância da compreensão da posição e dos termos mais comuns utilizados para descrever as partes específicas de um movimento de massa em uma vertente, uma vez que no tópico seguintes serão apresentados os tipos de movimentos (Figura 9) (Highland e Bobrowsky, 2008).

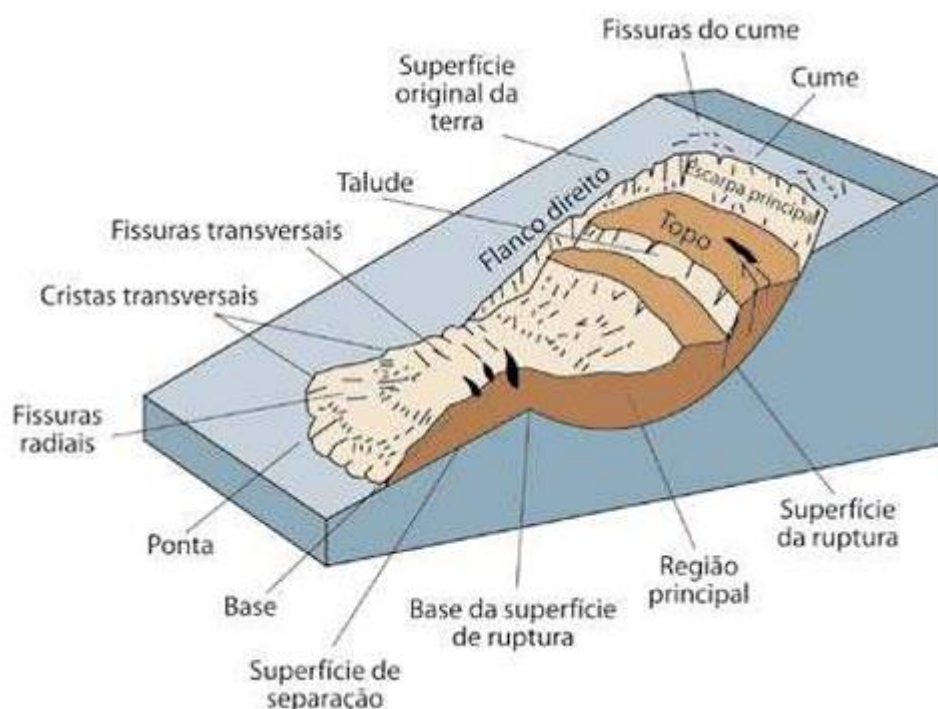


Figura 9- Partes e termos de um deslizamento (extraído de Highland e Bobrowsky, 2008 modificado de Varnes, 1978).

3.2 TIPOS DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

3.2.1 Escorregamentos

O termo *escorregamento* possui diversos sinônimos, sendo muito usado também o termo *deslizamento*. De acordo com Tominaga (2015) os *escorregamentos* são movimentos rápidos, de porção de solos ou rochas, com volumes definidos, deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou da vertente. Os *escorregamentos* ainda podem ser rotacionais/circulares, translacionais/planares ou em cunha (TOMINAGA *et al.*, 2015).

Nos **escorregamentos rotacionais** ou **circulares** (Figura 10) a sua superfície de ruptura é curva, por onde se tem o movimento rotacional do material. Este tipo de deslizamento geralmente é associado a solos espessos e homogêneos decorrente da alteração de rochas argilosas. O fenômeno é muito comum em regiões de clima tropical e sub-tropical, onde o manto de alteração é espesso (TOMINAGA *et al.* 2015).

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008) os *escorregamentos rotacionais* podem apresentar previsibilidade de acordo com fissuras no topo de sua geometria e podem ser desencadeados por chuvas intensas, contínuas e qualquer outro fenômeno que leve a

saturação do solo. Geralmente este tipo de movimento ocorre em taludes e encostas que variam de 20 a 40 graus em inclinação e a velocidade de deslocamento pode ser extremamente vagarosa (menos de 0,3 metros a cada 5 anos), moderadamente rápida (1,5 metros por mês) e até rápida.

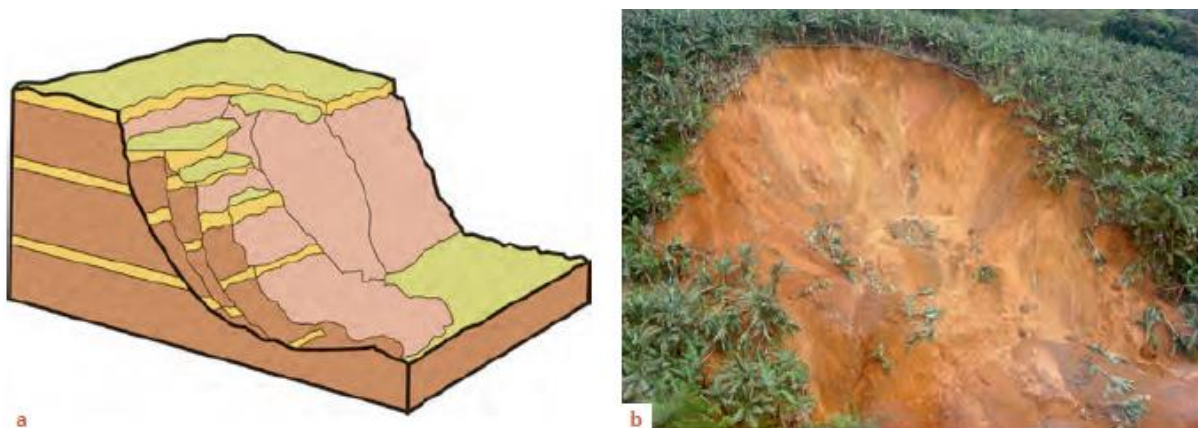


Figura 10 - a) Esquema de escorregamento rotacional e b) Escorregamento rotacional em Jaraguá do Sul, SC, dez.2008. Fonte: Tominaga et al. 2015.

Os **escorregamentos translacionais** ou **planares** (Figura 11) formam superfícies de ruptura planar em solos e rochas heterogêneos que apresentam algum tipo de descontinuidade mecânica e/ou hidrológica de origem geológica e geomorfológica ou pedológica. Este tipo de escorregamento normalmente é raso e ocorre em baixas declividades, podendo atingir centenas e milhares de metros de comprimento (TOMINAGA *et al.* 2015).

Além disso, o material transportado confere diferentes características ao deslizamento, podendo ser constituído por rocha, que ocorrem em planos de fraqueza de origem geológica como xistosidade, estratificação, bandamento metamórfico, acamamento, falhas, juntas de alívio de tensão entre outros. Quando o material é constituído por solo o movimento de forma tabular, dentro do manto de alteração, é caracterizado pela velocidade elevada e curta duração ao processo. Por fim, o escorregamento translacional pode ser composto por solo e rocha, com volume significativo de rocha, normalmente envolvendo massas de tálus/colúvio (TOMINAGA *et al.* 2015).

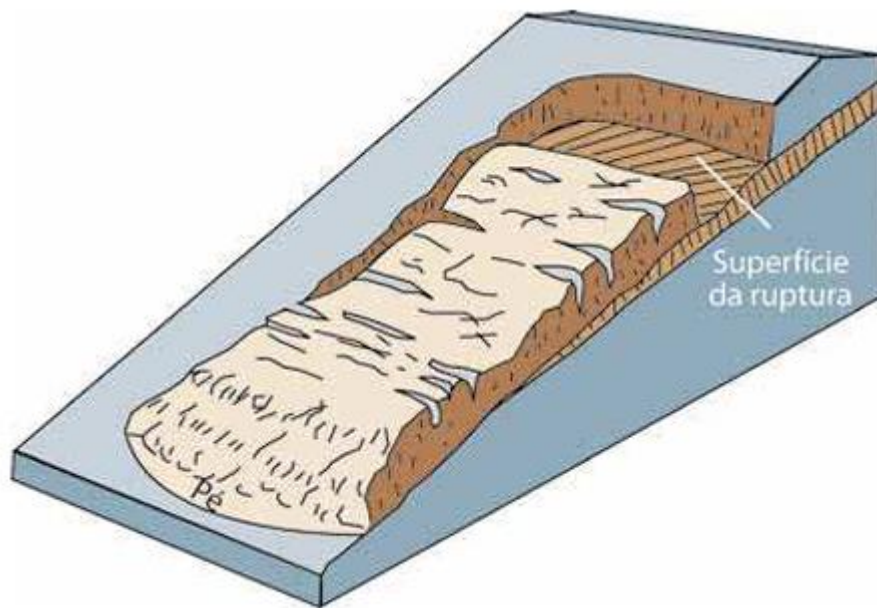


Figura 11- Esquema de um escorregamento translacional. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

Em regiões onde o relevo é fortemente controlado por estruturas geológicas é mais comum a ocorrência de deslizamentos em **cunha** (Figura 12). São associados a maciços onde se tem duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, fazendo com que o material deslocado adquira forma prismática ao longo do eixo de interseção dos planos (TOMINAGA *et al.* 2015).

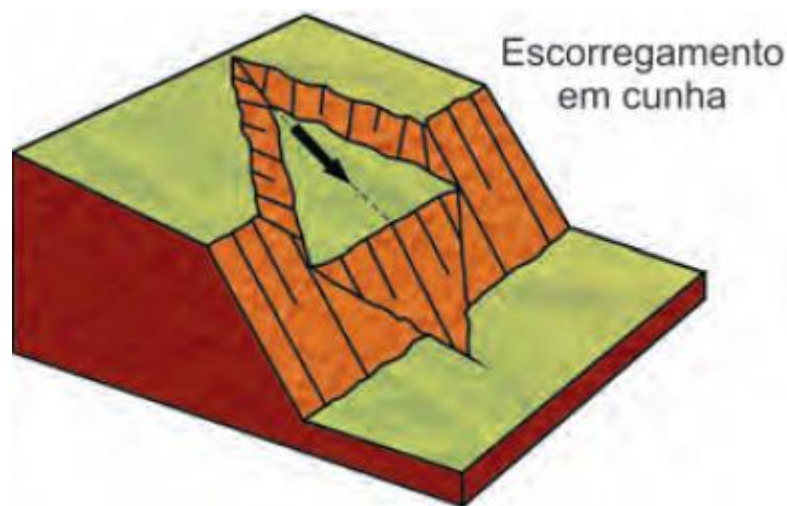


Figura 12- Esquema de um escorregamento em cunha. Fonte: Tominaga *et al.* (2015).

3.2.2 Queda de blocos

Este tipo de movimento gravitacional de massa ocorre quando blocos de rocha se desprendem de encostas extremamente íngremes, em um movimento de queda livre, na ausência de superfície de movimentação (Figura 13). A erosão regressiva do talude por processos naturais de rios, ribeirões, condições climáticas ou por atividades humanas como escavações e até mesmo terremotos ou outras vibrações são mecanismos comumente responsáveis pelo desencadeamento do processo (KOBAYAMA, 2006; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008; TOMINAGA *et al.*, 2015).

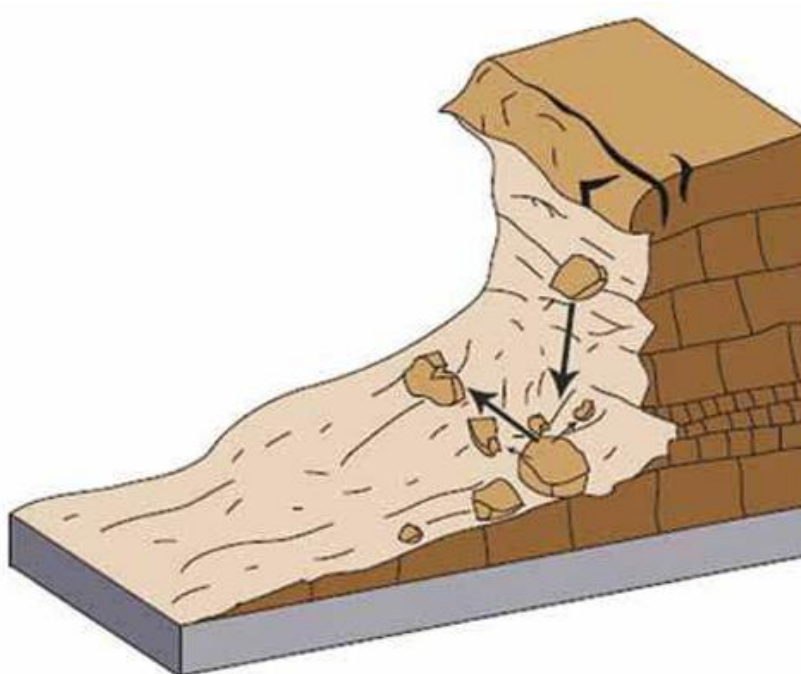


Figura 13 – Esquema de queda de rochas. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

3.2.3 Corridas ou Fluxo de detritos

As corridas ou fluxo de detritos (Figura 14) são formas de escoamento muito velozes, onde o material adquire um caráter hidrodinâmico devido a perda de atrito interno das partículas de solo, rocha e matéria orgânica, em virtude da modificação da sua estrutura interna quando se tem a presença de excesso de água (GUIDICINI e NIEBLE, 1984; TOMINAGA *et al.*, 2015).

O movimento pode atingir velocidades de até 56 km/h, dependendo da consistência e ângulo de inclinação, além de alcançar grandes distâncias. Normalmente o fenômeno é desencadeado pelo fluxo de água superficial devido a chuvas intensas e podem ser formados a partir de outros tipos de deslizamentos (HIGHLAND e BOBROWSKY 2008).

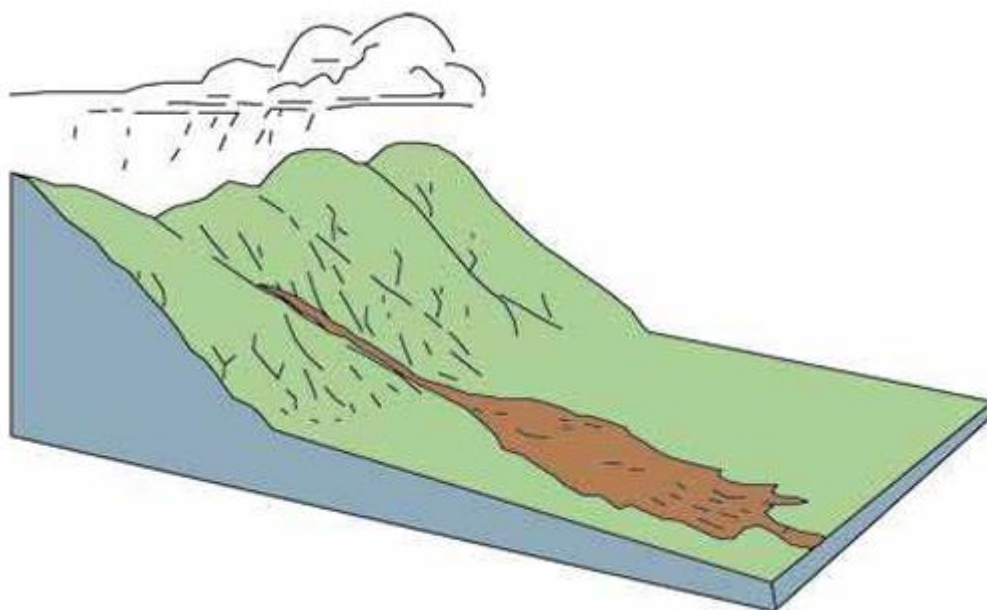


Figura 14 - Esquema de fluxo de detritos. Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

3.2.4 Rastejo

Os rastejos (Figura 15) consistem em um movimento vagaroso de fluxo de terra causados pela ação da gravidade aliado a efeitos climáticos. A variação térmica pode gerar expansões e contrações do material da encosta provocando o movimento vertente abaixo. Este tipo de movimento de massa tende a ocorrer quando a tensão de cisalhamento interna é suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar rupturas. O deslocamento lento do material pode ser identificado facilmente pela mudança de verticalidade de troncos das árvores, postes, muros de arrimo e pequenas ondas e cristas na superfície do solo (HIGHLAND e BOBROWSKY 2008; TOMINAGA *et al.*, 2015).

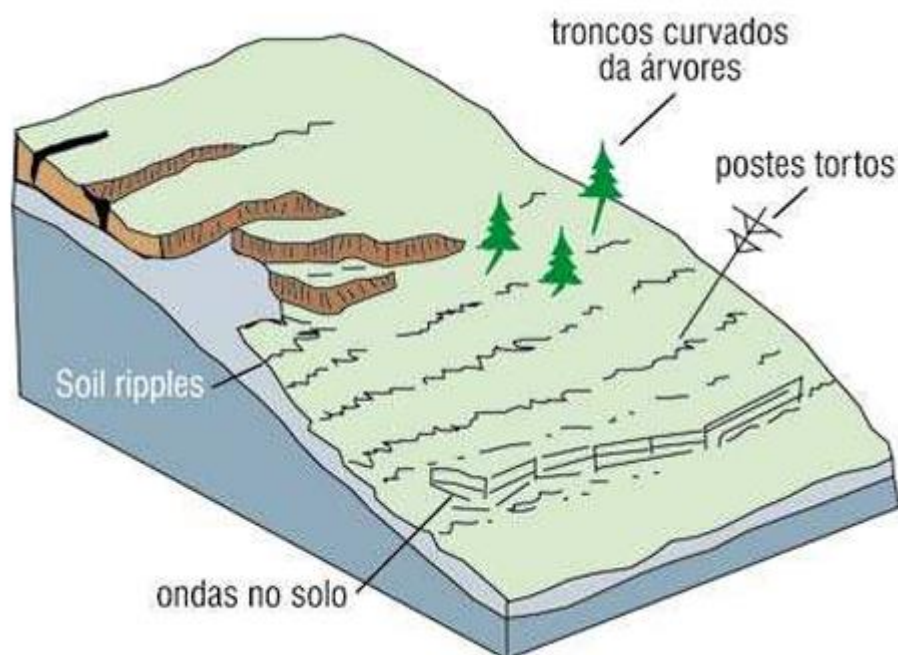


Figura 15- Esquema representando rastejo e algumas formas de identificação do processo: Highland e Bobrowsky (2008).

3.3 FATORES CONDICIONANTES DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa são condicionados por múltiplos fatores, tanto de origem natural e do meio físico quanto de origem antrópica. Segundo Guidicini e Nieble (1984), os fatores podem ser divididos em duas categorias: os agentes predisponentes e os agentes efetivos. Os fatores predisponentes dizem respeito às condições naturais do terreno, que concedem grau de instabilidade potencial à vertente. São exemplos as condições geológicas, morfológicas, topográficas e ambientais da área onde se encontra o MGM. Já os agentes efetivos são os responsáveis diretos do desencadeamento do movimento de massa (GUIDICINI E NIEBLE, 1984; TOMINAGA *et al.*, 2015).

Guidicini e Nieble (1984) ainda ressaltam que os agentes efetivos podem ser tanto preparatórios, quando diminuem a estabilidade da encosta antes de causar o fenômeno de MGM, quanto imediatos, quando são responsáveis pelo desencadeamento imediato do evento. Os autores acrescentam que os agentes como pluviosidade, meteorização física e química, oscilação de nível freático e ação antrópica como desmatamento podem ser classificados muitas vezes como preparatórios. Enquanto que eventos de chuva intensa, erosão, atividades

sísmicas, ventos fortes, interferência humana entre outros podem ser agentes efetivos na deflagração do movimento de massa. Quanto à interferência humana, destaca-se como importante agente modificador da dinâmica das encostas por conta da aceleração dos processos de instabilização gerados pelos diversos tipos de uso e ocupação do solo.

Correia (2015) descreve que o formato e a hidrologia da vertente são os principais agentes deflagrações de MGM. Conforme Fernandes *et al.* (2001) a declividade vem sendo utilizada como principal ou único parâmetro relacionado ao relevo, o que pode gerar problemas de interpretação já que outros fatores relacionados a topografia são importantes, além de ocorrerem MGM's em baixas declividades também. A morfologia da vertente possui papel importante como condicionante a movimento de massa. Ela irá configurar o processo de escoamento superficial e subsuperficial, que por sua vez pode favorecer a convergência ou divergência dos fluxos hídricos por suas porções côncavas e convexas do relevo (FERNANDES *et al.*, 2001; CORREIA, 2015).

Guerra (2001) destaca que ao decorrer de um evento chuvoso pode haver uma acentuada diminuição de permeabilidade na camada superficial ou em subsuperfície, que refletiria num escoamento superficial mais acelerado. Com isso, as variáveis curvaturas e áreas de captação merecem atenção, já que estão relacionadas com a concentração dos fluxos de água e com a consequente saturação dos solos.

De acordo com Popescu (1994) e Zêzere (2005) tem-se como fatores geológicos condicionantes de MGM os depósitos sedimentares não consolidados, presença de solos pouco espessos sobre rochas maciças e impermeáveis, presença de rochas alteradas ou fissuradas, descontinuidades estruturais e sua concordância com o declive e contrastes na permeabilidade e seus efeitos no regime hidrológico dos terrenos. Os autores também citam fatores relacionados a morfologia e morfometria, como a forma das vertentes e a sua influência na distribuição da água no solo e o declive das vertentes pelo controle exercido sobre as tensões tangenciais.

3.4 SUSCETIBILIDADE, PERIGO, VULNERABILIDADE E RISCO

Tendo em vista que termos como suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade e risco são constantemente mencionados quando se trata de desastres naturais, procurou-se esclarecer o significado de cada um, a fim de se evitar o equívoco de um termo por outro.

O termo **suscetibilidade** é o quão provável um determinado fenômeno pode ocorrer independente dos fatores sociais, mas tendo a sociedade como elemento de interferência de modificação da dinâmica natural, que acelera ou retarda (GIRÃO *et al.*, 2018).

A **vulnerabilidade** é descrita como um fator denominado de grau de perdas e danos, resultado das consequências que um determinado evento pode causar caso ocorra (BITAR, 2014). O termo **perigo**, por sua vez, expressa uma condição com potencial para causar consequências negativas em um dado período. Uma edificação abaixo de uma encosta em um período de fortes chuvas pode representar uma situação de perigo, tendo em vista a ameaça de ocorrer um movimento de massa que atinja a estrutura.

O conceito de **risco** corresponde a integração das análises de perigo e de vulnerabilidade, sendo uma medida da ameaça e das consequências (financeiras, bens, vidas) que poderá causar em um dado intervalo de tempo. Dessa forma, pode-se dizer que o risco só existe quando se tem a presença antrópica, sejam elas vidas ou estruturas, onde se tem perdas ou danos (BITAR, 2014).

3.5 MAPAS DE INVENTÁRIOS DE DESLIZAMENTOS

Os mapas de inventário de deslizamentos mostram a localização da ocorrência de movimentos gravitacionais de massa que deixaram características discerníveis em uma determinada área, podendo informar também a data da ocorrência e o tipo do movimento de massa (WIECZOREK, 1984).

O inventário pode ser preparado por diferentes métodos, dependendo do alvo, dos recursos disponíveis, da resolução espacial do produto analisado e da escala da investigação. O inventário pode ser organizado a partir da coleta de informações históricas sobre eventos de movimentos de massa ou a partir da análise de produtos obtidos por sensores remotos (imagens de satélite ou fotografia aérea) juntamente com o trabalho de campo (GUZZETTI *et al.*, 1994).

Um mapa de inventário de deslizamento pode ser usado para determinar a frequência da ocorrência de MGM e fornecer informações relevantes para a construção de modelos previsionais de suscetibilidade ou risco (GALLI *et al.*, 2008).

Deslizamentos deixam cicatrizes após sua ocorrência que podem ser reconhecidas, classificadas e mapeadas em campo, através da interpretação de fotografias aéreas, imagens de satélite ou em modelos digitais de terreno. A maioria dos sinais deixados por um movimento de massa são morfológicos, ou seja, são mudanças na forma, posição ou aparência da superfície topográfica. Outros sinais induzidos por um deslizamento podem refletir características litológicas, geológicas, de uso da terra e outros tipos de mudanças em superfície e subsuperfície (GUZZETTI *et al.*, 2012).

Os inventários de deslizamentos são classificados pela sua escala e tipo. O inventário de pequena escala (<1:200.000) são compilados principalmente a partir de dados obtidos na literatura, através de consultas em organizações públicas e privadas, jornais, publicações científicas e relatórios técnicos ou com especialistas em movimentos de massa, porém existem exemplos de mapas de inventário de pequena escala obtidos através da análise visual de um grande número de fotografias aéreas. Há também inventários de deslizamento de média escala (1:25.000 a 1:200.00), que são preparados a partir da interpretação sistemática de fotografias aéreas com escalas que variam de 1:60.000 a 1:10.000 e pela integração dos dados de campo com informações históricas de deslizamentos. Já os inventários de grande escala (>1:25.000) são preparados geralmente para áreas menores, usando tanto a interpretação de fotografias aéreas em escalas maiores que 1:20.000, como imagens de satélite ou modelos digitais de terreno de alta resolução espacial, e investigação de campo (GUZZETTI *et al.*, 2000; GUZZETTI *et al.*, 2012).

3.6 ANÁLISE POR PESOS DE EVIDÊNCIA (WEIGHTS OF EVIDENCE – WofE)

De acordo com Raines *et al.* (2001), essa metodologia combina dados espaciais de diversas fontes para descrever e analisar interações, fornecer suporte para tomadas de decisões, e para elaborar modelos preditivos. Este método foi desenvolvido originalmente para aplicação em diagnóstico médico, na relação entre sintomas e doenças, onde um conjunto de sintomas consistiam na evidência, e a hipótese era se o paciente tinha certa doença. Para cada sintoma um par de pesos foi calculado, um para a presença e outro para a ausência do sintoma. O valor dos pesos dependia da relação entre o sintoma e a ocorrência da doença em um grupo de pacientes. Por fim os pesos poderiam ser usados para estimar a probabilidade de

um novo paciente contrair a doença, baseada na presença ou a ausência dos sintomas e o inverso seria verdadeiro para pesos negativos (ARAÚJO, 2004).

Nas geociências, este método foi desenvolvido para pesquisas em exploração de ouro (BONHAM-CARTER *et al.*, 1989; AGTERBERG *et al.*, 1990; BONHAM-CARTER, 1994). Segundo Correia (2015) a aplicação do método passou a ser utilizada em diversas áreas das geociências, inclusive em análises de suscetibilidade a deslizamentos.

A técnica de modelagem espacial pesos de evidência é baseada no método de análise bivariada bayesiana. O método bayesiano consiste principalmente na ideia de probabilidade *a priori* e *a posteriori* e permite a transformação de uma série de dados determinísticos em probabilísticos, fazendo uso da teoria dos conjuntos para gerar funções de probabilidades condicionais (BARBIERI e CAMBULLI 2009; ARAÚJO 2004).

Esta técnica permite estimar valores que refletem as melhores associações espaciais entre os fatores condicionantes e o evento conhecido. Os valores representam a probabilidade de ocorrer um evento, dada a presença de um condicionante. No caso da avaliação de suscetibilidade a movimento de massa, o método analisa a relação entre a distribuição espacial dos locais afetados por MGM's e a distribuição espacial dos fatores condicionantes, além de calcular a influência que cada fator exerce, e com isso expressar a probabilidade de o MGM ocorrer em uma determinada área (BONHAM-CARTER 1994; BOLENEUS *et al.*, 2001; CORREIA 2015; POZZOBON 2013).

Probabilidade *a priori*

A probabilidade *a priori* assume que todos os eventos são igualmente prováveis dentro da área de estudo, desconsiderando o fato de que esse evento possa ser condicionado por um determinado fator, ou pela ação de vários fatores (BONHAM-CARTER 1994). O cálculo é feito de forma intuitiva e simples, sendo “P” a probabilidade de ocorrência do evento de movimento de massa, “E” o evento de movimento de massa, “A” o espaço amostral e “n” o número de elementos (Equação 1):

$$P(E) = \frac{n(E)}{n(A)} \text{ (Eq. 1)}$$

A partir da probabilidade *a priori*, Bonham-Carter (1994) propõe um cálculo de chances (*Odds*), pela razão entre a probabilidade de o evento ocorrer, pela probabilidade de o evento não ocorrer (Equação 2)

$$O(E) = \frac{P(E)}{1-P(E)} \text{ (Eq. 2)}$$

Probabilidade *a posteriori*

Com a adição de um fator condicionante, ou uma evidência (“B”), a probabilidade de o evento ocorrer pode ser modificada, sendo chamada de probabilidade *a posteriori*, ou probabilidade condicional (Equação 3):

$$P(E|B) = \frac{P(E \cap B)}{P(B)} \text{ (Eq. 3)}$$

Onde:

$P(E|B)$ representa a probabilidade condicional de ocorrer o evento E, considerando a presença da evidência B e; P representa a área total ocupada por E e B ao mesmo tempo.

Quando se tem a presença do evento E, porém com a ausência da evidência \bar{B} , a expressão (Equação 4) pode ser ajustada para:

$$P(E|\bar{B}) = \frac{P(E \cap \bar{B})}{P(\bar{B})} \text{ (Eq. 4)}$$

Da mesma forma que vale para representar o espaço ocupado pela probabilidade do evento não ocorrer $P(\bar{E})$ em relação a presença B ou ausência \bar{B} da evidência.

A diferença entre a inferência bayesiana e o método pesos de evidência é que o último utiliza uma formulação logarítmica natural do teorema de Bayes. Com o ajuste ao logaritmo natural da relação de probabilidades condicionais, tem-se os ponderadores de Bayes (W^+ e W^-) (Equações 5 e 6):

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(E|B)}{P(\bar{E}|B)} \right\} \text{ (Eq. 5)}$$

$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(E|\bar{B})}{P(\bar{E}|\bar{B})} \right\} \text{ (Eq. 6)}$$

Onde P é a probabilidade e ln é o logaritmo natural. B é a presença de um fator condicionante a MGM, \bar{B} é a ausência deste fator, E é a presença de movimento de massa e \bar{E} representa a sua ausência. A evidência exibirá correlação espacial positiva com os deslizamentos quando o peso de evidência positivo (W^+) possuir valores positivos e, o peso de evidência negativo (W^-) possuir valores negativos. A situação contrária (correlação

espacial negativa) com os deslizamentos ocorrerá quando o peso de evidência positivo (W^+) possuir valores negativos e, o peso de evidência negativo (W^-) possuir valores positivos.

O termo da equação $\frac{P(E|B)}{P(\bar{E}|B)}$ se refere a razão de suficiência, e $\frac{P(E|\bar{B})}{P(\bar{E}|\bar{B})}$ à razão de necessidade. Agtenberg (1989), Rostirolla *et al.* (1998), Soares *et al.* (2002) descrevem que a favorabilidade representa uma avaliação quantitativa da expectativa de ocorrência do evento, resultado da diferença entre as razões de suficiência e necessidade. Sendo uma evidência mais necessária quanto mais ela está ausente onde o evento não ocorre e tanto mais suficiente quanto maior a proporção de ocorrência do evento em que ela está presente (POZZOBON, 2013).

A necessidade é a medida de verificação de que, “se a evidência B é falsa, então a hipótese E não é verdade”. A suficiência, por sua vez, mede a veracidade da afirmação “se B é verdade, então E também é”. Então, a condição de suficiência de uma evidência é cumprida quando a probabilidade de ocorrência do movimento de massa é maior com a existência da variável, enquanto a condição de necessidade da variável é satisfeita quando a probabilidade de não existência do evento é maior com a não existência da variável (SOARES *et al.*, 2002). No cenário mais provável, o movimento de massa tende a ocorrer onde se tem um conjunto de evidências diagnósticas, apresentando os mais altos graus de necessidade e suficiência (POZZOBON, 2013).

O contraste (C) compreende o resultado da diferença entre os dois termos. O valor de contraste calculado pela diferença entre o peso positivo e negativo avaliado torna-se um bom indicador de sua relação com os deslizamentos, conforme a Equação 7:

$$C = (W^+) - (W^-) \text{ (Eq. 7)}$$

Quanto menor o valor de C, a presença do parâmetro considerado afeta minimamente a distribuição dos deslizamentos na área. Inversamente, quando C possui valor mais elevado a correlação passa a ser mais significativa.

Na aplicação da técnica de pesos de evidências, os dados podem ser tratados de duas formas para a determinação dos pesos, sendo o método categórico e o método cumulativo. No primeiro caso, os dados ocorrem em categorias não relacionadas e mutuamente exclusivas. Já o método cumulativo é empregado quando os dados são relacionados (BOLENEUS *et al.*, 2001).

4 ESTUDOS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA DA REGIÃO

Em novembro de 2008, a região do médio e baixo Vale do Itajaí foi assolada por um intenso evento pluviométrico, responsável pelo desencadeamento de diversos movimentos gravitacionais de massa. O evento foi configurado como o maior desastre da história do estado de Santa Catarina, atingindo cerca de um terço do território catarinense e fazendo com que 63 municípios decretassem Situação de Emergência e outros 14, Estado de Calamidade Pública (PARIZOTO, 2014).

Após o ocorrido, a região do Vale do Itajaí passou a ser foco de diversos trabalhos tanto por parte da comunidade acadêmica quanto por órgãos governamentais na busca da compreensão acerca dos desastres naturais e na prevenção à futuros desastres. Dentre estes trabalhos, muitos deles são referentes ao estudo de movimentos gravitacionais de massa. Abaixo são revisados alguns destes trabalhos efetuados nas proximidades da área de estudo e da região do Vale do Itajaí.

Tomazzoli, Flores e Bauzys (2009) caracterizaram os diversos tipos de movimentos de massa que ocorreram em novembro de 2008, no entorno do Morro do Baú, na região do Vale do Itajaí e suas relações com feições geológicas e geomorfológicas. Os autores constataram que os escorregamentos translacionais rasos foram os movimentos de massa mais frequentes e que ocorreram, preferencialmente, no domínio das rochas do CGSC, onde os solos são espessos, associados a elevadas declividades das encostas de vales que estão balizadas por falhas e cobertas por densa vegetação. Escorregamentos rotacionais e os fluxos de detritos também foram numerosos.

Flores, Pellerin e Égas (2009) realizaram um levantamento de MGM's no município de Gaspar, nos bairros de Belchior Baixo e Sertão Verde. Através da caracterização dos processos de movimentos gravitacionais, com base em critérios geomorfológicos, geológicos e pedológicos associado ao uso e ocupação do espaço geográfico foi identificado que ocorreram movimentos de massa de caráter híbrido em depósitos de cascalho e rochas gnáissicas em Belchior Baixo. As rochas com espesso manto de alteração do CGSC foram responsáveis por grandes deslizamentos do tipo rotacional, já em Sertão Verde se salienta a marcada combinação das estruturas geológicas desfavoráveis aos cortes de taludes e a expansão urbana. Os autores ainda constatarem que as rochas da Bacia do Itajaí apresentam estruturas geológicas que mergulham em concordância com a inclinação da vertente.

Santos e Marimon (2011) caracterizaram os movimentos de massa ocorridos na microbacia do rio Itoupava, em Rio do Sul, em 2008. Os autores relataram que o município possui alta frequência de ocorrência de movimentos de massa, e na microbacia do rio Itoupava, as ocorrências desses fenômenos são constatadas diante de evidências de evolução das encostas. Segundo os autores o desenvolvimento de rastejos e escorregamentos é predominante em rochas da Formação Rio do Sul, e a queda de blocos é mais frequente na Formação Rio Bonito.

Bauzys (2012) trabalhou na confecção de inventário de movimentos de massa ocorridos no evento de 2008 no alto da bacia do Ribeirão Belchior, no município de Gaspar. A autora identificou ao todo 36 movimentos de massa de grande extensão e outros 20 de pequena extensão e verificou que o alto da bacia se encontra em uma área bastante suscetível a ocorrência de movimentos de massa, principalmente devido ao relevo acidentado, com presença de vertentes íngremes, cobertas por um solo espesso sobre as rochas gnáissicas do CGSC e a alta densidade hidrográfica, em uma região de clima úmido, sempre sujeita a elevados índices de precipitação.

Tomazzoli *et al.* (2012) realizaram a análise e mapeamento de áreas de risco a movimentos de massa e inundação nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luis Alves, na área denominada de Complexo Morro do Baú. Através do levantamento geológico-geomorfológico e do uso e cobertura do solo foi feita a delimitação de áreas de suscetibilidade e risco a deslizamento e inundações. Os autores concluíram que, grande parte dos planos de ruptura ocorridos na área encontravam-se no contato solo-rocha, em solos areno-siltosos. O trabalho ainda descreve que a maior parte dos movimentos de massa estavam relacionados a altas declividades, em orientação de encosta para nordeste, de formato côncavo, em solo sobre arenitos arcoseanos da Bacia do Itajaí e rochas máfica-ultramáficas do CGSC e em área destinadas ao plantio e à pecuária.

Bini (2012) realizou a análise dos movimentos de massa nas microbacias fluviais de Saltinho, Belchior Baixo, Sertão e Porto Arraial, no município de Gaspar, a fim de identificar os fatores condicionantes responsáveis pela ocorrência de movimentos de massa. No trabalho foram mapeadas 96 cicatrizes de movimentos de massa que ocorreram essencialmente no desastre de novembro de 2008. Segundo a autora, os movimentos de massa foram predominantes nos segmentos côncavos das encostas e nas litologias associadas ao Bacia do Itajaí. Além disso, constatou que as diversas obras de cortes de taludes da área de estudo intensificaram o processo de movimento de massa.

Correia *et al.* (2013), através do método de Peso de Evidência mapearam áreas suscetíveis a deslizamentos na região do baixo Vale do Itajaí. Os autores identificaram no estudo que a maior parte dos deslizamentos ocorre em inclinações de 20 e 35°, em orientações de encosta para norte, curvaturas em perfil divergente, direção de fluxo sudeste e sul, NDVI entre 0,7 e 0,85 e em rochas metamórficas do CGSC.

Sbroglia e Higashi (2013) realizaram o mapeamento geotécnico preliminar de áreas suscetíveis a movimentos de massa na microbacia do Ribeirão Baú, no município de Ilhota, com intuito de identificar as unidades geotécnicas mais propensas à ocorrência de movimento de massa. Os autores descrevem que, devido à elevada declividade, espesso manto de intemperismo e ampla rede de fraturas e falhas, as áreas de cambissolo desenvolvidas sobre as rochas metamórficas do CGSC foram as mais afetadas por movimentos de massa, com registro de 315 ocorrências, seguida pelo cambissolo de substrato de arenito da Bacia do Itajaí, com 311 ocorrências.

Lima (2013) efetuou a análise de suscetibilidade a deslizamentos por critérios topográficos do alto da Bacia do Ribeirão Belchior, em Gaspar. A aplicação do modelo probabilístico proposto por Chung e Fabbri (1999) permitiu quantificar as unidades de terreno com relação à suscetibilidade a deslizamentos translacionais. O autor ainda observou que em altas declividades, em encostas de formato côncavo os deslizamentos ocorriam de forma mais frequente.

Pozzobon (2013) realizou a análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau, com o uso de análise probabilística através do método pesos de evidência. O autor relaciona espacialmente os fatores condicionantes geologia, geomorfologia e de uso e cobertura do solo com os 294 deslizamentos translacionais mapeados. Foi concluído que cerca de 25% da área possui alta a muito alta suscetibilidade a deslizamentos translacionais.

Parizoto (2014) correlacionou os diferentes fatores condicionantes aos processos de deslizamento e a influência antrópica com o evento ocorrido em 2008 na região do Complexo Morro do Baú, em Ilhota. Através de modelos probabilísticos e dados de geologia, pedologia, altimetria, declividade, orientação das encostas e distância de rios e estradas o autor gerou cartas de suscetibilidade a deslizamentos da área de estudo. O autor ainda conclui que 97,76% dos deslizamentos ocorreram nas rochas gnaíssicas e máficas do CGSC e nos arenitos arcoseanos da Bacia do Itajaí.

Correia (2015) avaliou as diferentes técnicas de modelagem de dados espaciais aplicadas à análise de risco a deslizamento no Baixo Vale da Bacia do Rio Itajaí-Açu. A

associação espacial entre os fatores condicionantes e os deslizamentos foi feita com base na modelagem pesos de evidência, inferência fuzzy e o Índice de Suscetibilidade a Deslizamento (ISD). De acordo com o autor a técnica ISD foi a que obteve melhor resultado mostrando que o terço superior das vertentes são mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos.

Gerente, Bini e Luiz (2015) analisaram a forma de relevo como condicionante de movimento de massa na Bacia do Saltinho em Gaspar. Segundo os autores, a forma de encosta convexa foi a que apresentou a maior quantidade de ocorrências de movimentos de massa, justamente a forma que dispersa os fluxos d'água. Movimentos de massa também foram detectados em formas côncavas, bem como nas formas retilíneas em menor quantidade. Os autores ainda descrevem que a forma da encosta foi um fator pouco importante na deflagração de movimentos de massa em relação à grande quantidade de precipitação que ocorreu na área de estudo.

Bini *et al.* (2016) realizaram a segmentação das cicatrizes de deslizamento de movimento de massa baseado em análise orientada a objeto geográfico para o Médio Vale do Rio Itajaí-Açu. Para o trabalho foi utilizado como material de base uma imagem orbital Rapideye de março de 2009, quatro meses após a ocorrência dos movimentos de massa. Os autores concluíram que o método de segmentação utilizado possibilitou mapear automaticamente as cicatrizes de deslizamentos mediante uma técnica menos subjetiva e menos exaustiva que o processo de vetorização manual.

Luiz *et al.* (2016) estudaram a influência de lineamentos estruturais na ocorrência de movimentos de massa na bacia do Rio Luís Alves, no Vale do Itajaí. Através da confecção de inventário de movimento de massa, do mapa de lineamentos estruturais e da observação em campo concluíram que a maioria dos movimentos de massa ocorrem na mesma região onde estão a maior concentração de cruzamentos de lineamentos.

Coutinho (2016) analisou a suscetibilidade a movimentos de massa na área urbana do município de Rodeio com o uso do método de pesos de evidência. Para tal, a autora utilizou dados de declividade, unidade geotécnicas, geologia e orientação das vertentes. Foi concluído que os cambissolos em gnaisses, declividades entre 25 e 45° e vertentes orientadas para leste, norte, nordeste e sudeste foram os componentes mais suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa.

Sbroglia *et al.* (2016) realizaram o mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, no município de Ilhota, com a utilização de

modelagem matemática. Para o estudo foi realizado o mapeamento geotécnico e utilizado método SHALSTAB.

Mallmann (2018), através da utilização da lógica *fuzzy*, realizou o mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa no bairro Nova Esperança, localizado em Blumenau. O autor concluiu que as regiões mais propensas à movimentos de massa são as áreas que ocorrem conglomerados e arenitos grossos da Bacia do Itajaí e gnaisses do CGSC.

Schramm (2019) também trabalhou na identificação de áreas suscetíveis a deslizamentos no município de Blumenau utilizando lógica *fuzzy*. O autor, por sua vez, estudou a Microbacia do Córrego Gebien, no bairro Valparaíso. Foi identificado que as áreas mais suscetíveis ocorrem em solo exposto e área urbana, terrenos com inclinação de mais de 30% e áreas localizadas sobre siltitos da Bacia do Itajaí, assim como áreas afetadas por falhas sinistrais, no contato entre riolito e arenito fino.

Osako (2021) atualizou o inventário de movimentos de massa do município de Brusque com base em ortofotos analisadas juntamente com relevo sombreado obtidos através de modelo digital de terreno e de elevação. A autora identificou 500 deslizamentos, correspondendo a uma densidade de 1.76 deslizamentos por km². Além disso, identificou que a maior parte dos deslizamentos se concentram em rochas metamórficas do CMB e que mais de 80% dos deslizamentos mapeados ocorrem em áreas de alta a moderada suscetibilidade.

Maccari (2022) apresenta a análise de suscetibilidade a movimentos de massa do município de Ascurra. O autor descreve que a suscetibilidade a deslizamentos é mais alta em declividades entre 50 e 60°, encostas voltadas para norte e nordeste, uso e ocupação do solo para campos e pastagens, e em rochas gnáissicas do CGSC e pelíticas da Bacia do Itajaí.

5 MATERIAIS E MÉTODO

5.1 MATERIAIS

Revisão Bibliográfica: Para a realização deste trabalho, foram consultadas diversas referências bibliográficas disponíveis em periódicos e relatórios técnicos de órgãos públicos a fim de ampliar o conhecimento acerca dos temas abordados neste estudo

Dados vetoriais e matriciais:

-Mapa geológico de Santa Catarina, escala 1:500.000, em formato *shapefile*, de Wildner *et al.* (2014).

-Unidades Geomorfológicas do Brasil, em escala 1:250.000, disponibilizado pelo IBGE em formato *shapefile*.

-Modelos Digital de Terreno (MDT) e de Superfície (MDS) de resolução original de 1x1m, em formato *geotiff*. Articulação das folhas SG-22-Z-B-IV-3, SG-22-Z-B-IV-4, SG-22-Z-D-I-1 e SG-22-Z-D-I-2 disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social de Santa Catarina (SDS-SC).

-Fotografias Ortoretiladas com resolução espacial de 0,39x0,39m, produto do Levantamento Aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina em escala 1:10.000, do ano de 2010, em formato *geotiff*, correspondente as folhas SG-22-Z-B-IV-3, SG-22-Z-B-IV-4, SG-22-Z-D-I-1 e SG-22-Z-D-I-2 e disponibilizadas pela SDS-SC.

-Área densamente edificada em formato *shapefile*, disponível na base cartográfica do estado de Santa Catarina do IBGE, em escala 1:25.000.

-Hidrografia, disponibilizada pela Agência Nacional das Águas (ANA) e pela Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), em escala 1:250:000, formato *shapefile*.

-Rede viária, disponibilizado na plataforma colaborativa *OpenStreetMap* (OSM).

-Curvas de nível, de equidistância de 10m, extraídas através do MDT na forma de linhas.

-Zoneamento do município de Indaial em formato *shapefile*, disponibilizado pela Associação de Municípios do Médio Vale do Itajaí (AMMVI), do ano de 2011.

-Imagens do satélite CBERS-4A, sensor WPM, correspondente a cena CBERS4A_WPM20514720200919 obtida no dia 19 de setembro de 2020, com 0% de cobertura de nuvens, e resolução de 8 m para as bandas espectrais e 2 m para a banda pancromática, disponibilizadas pela Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em formato *geotiff*.

-**Imagens de satélite do *Google Earth***, acessadas através do programa *Google Earth Pro* e do Plugin *QuickMapService* do QGIS

Softwares:

-QGIS, *software* livre, utilizado para integração e análise dos dados em ambiente SIG.

-Arcgis Pro, *software* utilizado com licença estudantil para classificação dos intervalos de suscetibilidade.

-*Google Earth Pro*, utilizado para identificação e análise espacial de cicatrizes de MGM recentes, e auxílio em campo.

-*OpenStreetMap*, plataforma colaborativa utilizada para vetorização de redes viárias.

-*Microsoft Office Excel*, utilizado para organização e cálculo de dados numéricos.

5.2 MÉTODO

Para a elaboração deste trabalho, optou-se por utilizar o método *Weight of Evidence* (WofE), ou pesos de evidência na análise a suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa. No mapeamento de áreas suscetíveis a MGM em ambiente SIG são utilizados basicamente dois modelos empíricos, sendo eles os modelos guiados pelos dados (*data-driven*), e os modelos guiados pelo conhecimento de um especialista a respeito dos dados (*knowledge driven*) (BONHAM-CARTER, 1994).

Para este trabalho foi utilizado o modelo guiado pelos dados, que oferece uma abordagem mais objetiva, dependendo das relações matemáticas entre os MGM's e os mapas de evidências sem interferência subjetiva do especialista. O modelo guiado pelos dados ainda é favorecido quando se possui um bom inventário de movimentos de massa, com grande número de ocorrências, ao contrário do modelo guiado pelo conhecimento, o qual não necessita de um inventário robusto, uma vez que os pesos dos fatores condicionantes são atribuídos por meio de análise subjetiva (CORREIA, 2015).

O método de pesos de evidência é baseado no modelo estatístico bayesiano bivariado, no qual se considera a probabilidade *a priori* e a *posteriori*, seguindo os princípios da análise probabilística condicional, que por sua vez consiste em determinar a probabilidade de ocorrer um evento, no caso deste trabalho um MGM, dada uma evidência ou

condicionante. O método permite avaliar a distribuição espacial dos pontos afligidos por MGM (pontos de treinamento) e a distribuição espacial dos fatores condicionantes, para então calcular o grau de influência de cada fator (CORREIA, 2015).

A Figura 16 a seguir ilustra as etapas efetuadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

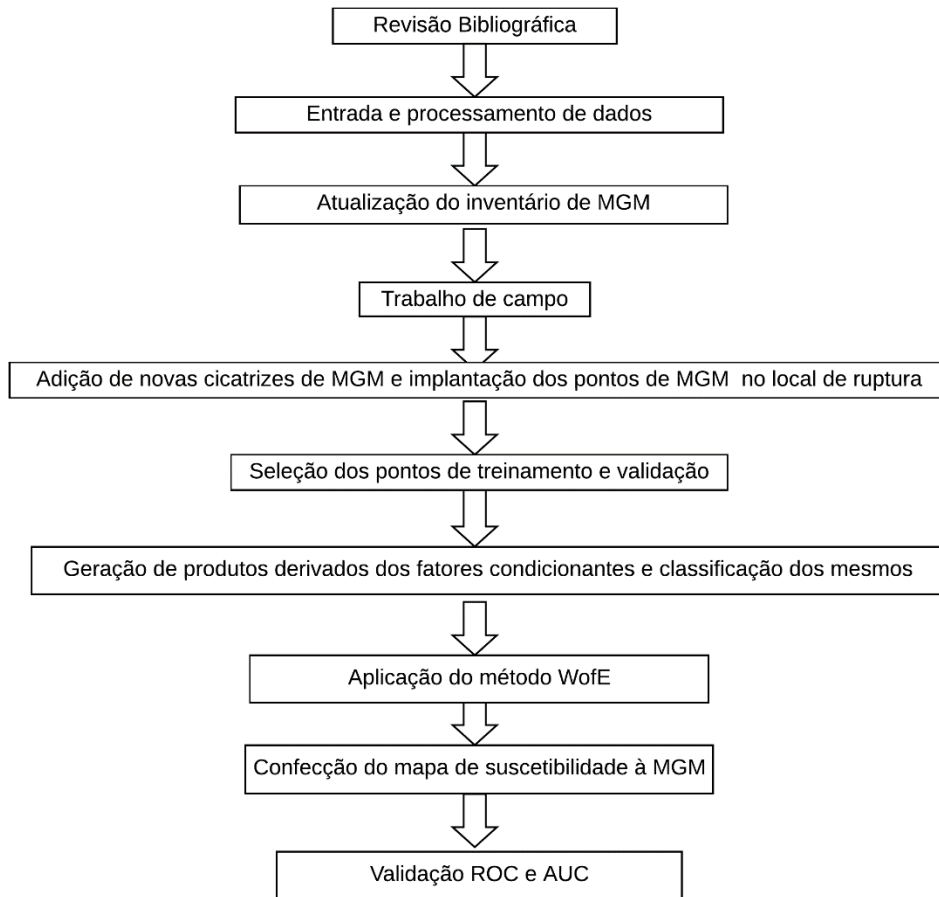


Figura 16 – Fluxograma geral das atividades que foram executadas neste trabalho.

5.2.1 Atualização do Inventário de Movimento Gravitacional de Massa

A atualização do inventário de movimento gravitacional de massa seguiu o fluxograma detalhado com a descrição dos dados utilizados e as principais etapas envolvidas (Figura 17).

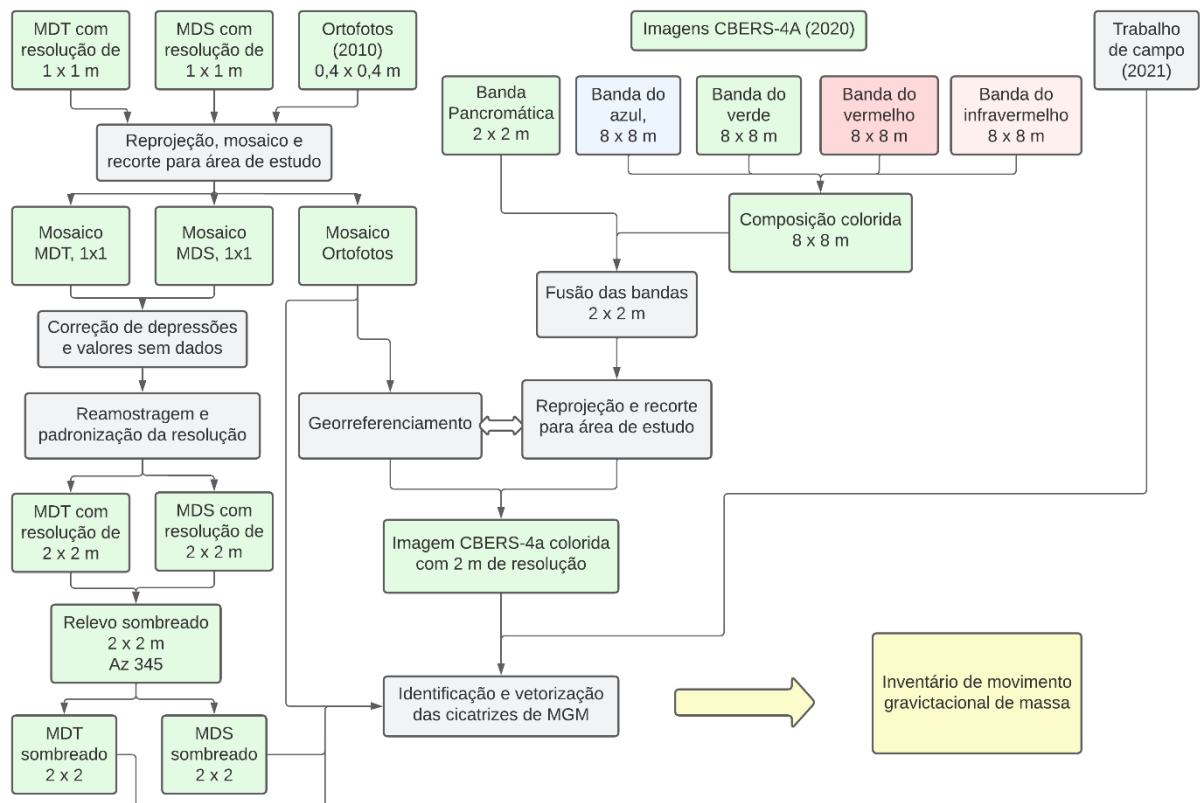


Figura 17 – Fluxograma mostrando as etapas envolvidas na confecção do inventário de MGM.

Inicialmente, os dados vetoriais e matriciais citados anteriormente foram organizados em pastas e ordenados no programa QGIS. Os dados *raster* como ortofotos, modelo digital de terreno e superfície (MDT e MDS) passaram pelo processo de confecção do mosaico, reprojeção dos dados para o sistema de coordenadas do projeto (SIRGAS 2000 / UTM 22S) e recorte para a área da sub-bacia do Rio Encano. A ferramenta *r.fill.dir* do GRASS foi utilizada para corrigir os valores sem dados e cobrir as depressões existentes no modelo digital de terreno. Todos os dados *raster*, exceto as ortofotos foram reamostrados para uma resolução espacial de 2 m, a fim de padronizar o tamanho de pixels. Por fim, o MDT e MDS foram processados para a geração do relevo sombreado, de elevação da iluminação de 45° e azimute solar de 345°.

As imagens multiespectrais do satélite CBERS-4A foram agrupadas através da ferramenta *raster* “Mesclar”, para então ser feita a fusão com a banda pancromática por meio da ferramenta *Pansharpening*, obtendo a composição colorida com resolução espacial de 2 metros. As imagens geradas foram reprojecadas para o sistema de coordenadas do projeto e

posteriormente georreferenciadas utilizando as ortofotos como base, a fim de corrigir o deslocamento observado entre os dois produtos obtidos por sensores remotos

A elaboração do inventário de MGM foi feita através da interpretação visual das ortofotos, relevo sombreado dos modelos digitais de terreno e de superfície (MDT e MDS) e imagens de satélite CBERS-4A. Como as ortofotos, MDT e MDS são produtos do mesmo levantamento, isso possibilitou que fossem utilizadas em conjunto.

A identificação das cicatrizes de deslizamento foi realizada como descrito em Guzzeti *et al.* (2012), com base em características como o formato e geometria, tamanho, profundidade, cor, tonalidade, textura, topografia do local, ausência de vegetação e até a presença de depósito de tálus em deslizamentos recentes. Inicialmente foram identificadas cicatrizes de MGM nas fotografias aéreas. Após a identificação inicial, os produtos com relevo sombreado dos MDT e MDS foram analisados para a identificação e confirmação da ocorrência de cicatrizes de MGM. O complemento *Qgisthreeis* também foi utilizado para a visualização tridimensional da cicatriz (Figura 18).

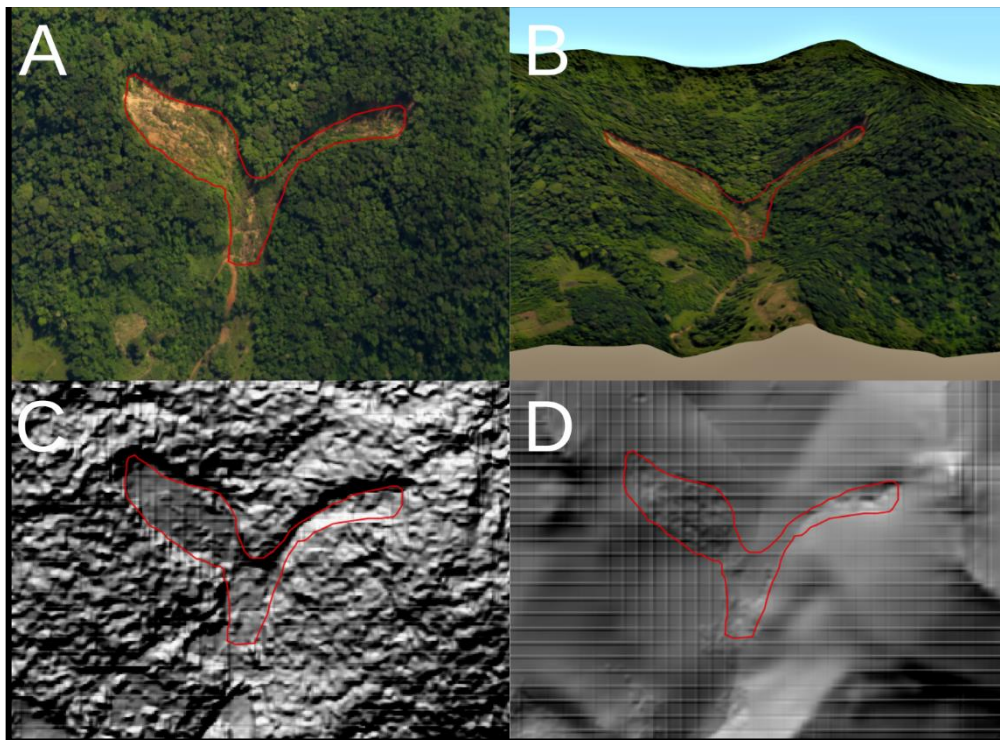


Figura 18 - Exemplo de cicatriz de movimento de massa delimitada pela linha vermelha. A) Identificação de cicatriz em ortofoto. B) Cicatriz exibida em ortofoto sobre MDT em visualização tridimensional. C) Cicatriz exibida em MDS. D) Cicatriz exibida MDT.

Subsequentemente, foram identificadas cicatrizes de MGM em imagens do CBERS-4A. Visto que não há imagem temporal de MDT e MDS para a mesma data das imagens de satélite, o mapeamento de cicatrizes de MGM baseou-se na identificação de locais de solo exposto em meio à vegetação.

A atualização final do inventário de MGM foi completada com a adição de cicatrizes de movimento de massa identificadas em trabalho de campo. Por fim, foi feita a inserção dos pontos de localização de cada cicatriz no provável local de ruptura do movimento de massa (escarpa principal) com a intenção de considerar na análise de suscetibilidade o local onde foi desencadeada a ação.

5.2.2 Trabalho de campo

O trabalho de campo foi realizado entre o dia 18 a 20 de outubro de 2021, a fim de se realizar o reconhecimento da área de estudo e verificar a ocorrência de cicatrizes de movimentos de massa mapeadas em imagens de satélite, ortofotos e relevo sombreado de MDT e MDS, além da identificação de novas cicatrizes para posterior implementação ao inventário de MGM.

5.2.3 Seleção dos pontos de treinamento e validação

A seleção dos pontos de treinamento e de validação do inventário de cicatrizes de MGM foi feita de forma aleatória, sendo destinado 70% dos pontos de cicatriz de MGM para atribuição dos pesos das classes de cada fator condicionante (pontos de treinamento) e os demais 30% foram reservados para posterior etapa de validação do trabalho (pontos de validação).

5.2.4 Fatores Condicionantes

Foram escolhidos para a realização deste trabalho seis fatores condicionantes a ocorrência de MGM, sendo eles: litologia, declividade, distância de principais estruturas geológicas, orientação das encostas, altitude e cobertura vegetal. A seleção dos fatores foi realizada de acordo com as características geológicas, geomorfológicas e de uso e ocupação do solo da área de estudo, além da pesquisa de diversos trabalhos relacionados a análise a

suscetibilidade a movimento de massa (LEE, 2007; POZZOBON, 2013; CORREIA *et al.*, 2015; COUTINHO, 2016; MALLMAN, 2018; TSANGARATOS *et al.*, 2018; SCHRAMM, 2019; MACCARI, 2022).

O fluxograma da Figura 19 mostra os dados utilizados como base para a elaboração dos mapas de fatores condicionantes.

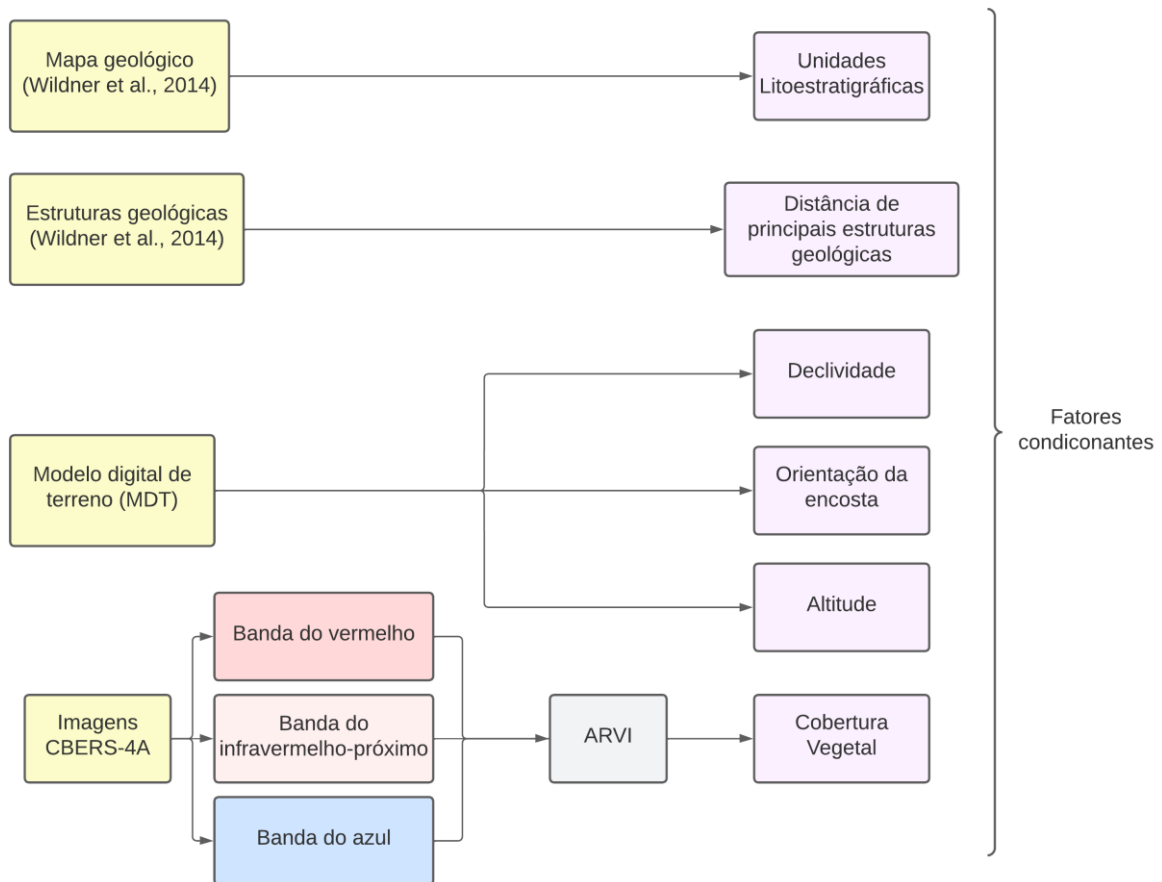


Figura 19 – Fluxograma de dados utilizados para confecção dos mapas de fatores condicionantes.

5.2.4.1 Unidades Litoestratigráficas

A litologia é responsável por boa parte das características do terreno, podendo apresentar fatores favoráveis à ocorrência de movimentos de massa, a depender da sua composição e conseqüentemente do comportamento mecânico, espessura de solo sobre a rocha, existência de descontinuidades, concordância com declive, resposta ao regime hidrológico, entre outros (POPESCU, 1994; ZÊZERE, 2005).

Neste trabalho o fator condicionante relacionado à litologia foi feito de acordo com a divisão das unidades litoestratigráficas do mapa geológico de Wildner *et al.* (2014) através do arquivo em formato *shapefile* do estado de Santa Catarina, recortado para a área de estudo, englobando 14 unidades, onde cada unidade corresponde a uma classe.

5.2.4.2 Principais estruturas geológicas

As estruturas geológicas são representadas por falhas, fraturas e zonas de cisalhamento, além de lineamentos morfoestruturais, que constituem feições topográficas representadas por cristas e vales alinhados. Estas estruturas caracterizam descontinuidades que desempenham um papel importante na infiltração e circulação de água, influenciando diretamente no processo de intemperismo das rochas. As estruturas podem ainda formar zonas de desenvolvimento preferencial de linhas de drenagem retilíneas, representando potencial indicador de favorabilidade à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa (SOARES *et al.*, 2007; TOMINAGA, 2007).

As principais estruturas geológicas foram obtidas pelo mapeamento do Serviço Geológico do Brasil (WILDNER *et al.*, 2014), e disponibilizadas em formato *shapefile* junto ao mapa geológico de Santa Catarina. As principais estruturas observadas na área de estudo constituem principalmente zonas de cisalhamento, fraturas e falhas. Neste trabalho optou-se por analisar a relação de proximidade das estruturas geológicas com a ocorrência de MGM. Para isto foram criados 05 multi-anéis (buffers) a partir de cada estrutura geológica com distância de 100 metros entre cada anel até a distância de 500 m, além de uma classe englobando distâncias superiores a 500 m, totalizando 6 classes.

5.2.4.3 Declividade

A declividade da encosta é caracterizada pelo ângulo de inclinação da superfície local em relação ao plano horizontal e refere-se à relação entre amplitude e a distância de um ponto a outro no plano horizontal. A declividade está diretamente relacionada aos processos dinâmicos das vertentes, a destacar a influência que ela exerce sobre os processos de denudação e sobre as tensões tangenciais (VALERIANO, 2008; MOREIRA e NETO 1998; ZÉZERE, 2005).

A declividade foi obtida através do MDT da área de estudo e da ferramenta *declividade* disponível no *software* QGIS. Para a análise a suscetibilidade, a classificação de declividade foi feita em graus, em intervalos de 10°, totalizando 9 classes.

5.2.4.4 Orientação das encostas

A orientação das encostas/ vertentes é definida pelo ângulo horizontal da direção esperada do escoamento superficial, expressa em azimute em relação ao Norte geográfico. Pode indicar de maneira indireta, os efeitos sobre a estabilidade das encostas de fatores relacionados à atuação dos teores de umidade, direção de precipitação e a quantidade de luz solar incidente (VALRIANO, 2008; POZZOBON (2013); CORREIA *et al.*, 2015).

A orientação da encosta foi obtida com a utilização do MDT, aplicado à ferramenta *Orientação* do QGIS e dividida em pontos cardeais e colaterais, correspondendo a 8 classes.

5.2.4.5 Altitude

A altitude é diretamente relacionada às feições geomorfológicas, podendo conferir diferentes formas de relevo e, portanto, influenciar na concentração de água no solo, cobertura e espessura do solo por exemplo. Em geral, vertentes localizadas em grandes altitudes estão relacionadas à maior propensão à ocorrência de movimentos de massa (TOMINAGA, 2007).

A altitude foi gerada como produto do MDT e foi fragmentada em intervalos de 100 metros, totalizando 11 classes.

5.2.4.5 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, visto que a vegetação atua na atenuação da ação dos agentes climáticos sobre as encostas, evitando variações bruscas de umidade e temperatura e diminuindo a quantidade de água infiltrada, além de frear parte do escoamento superficial (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

O mapeamento da cobertura vegetal foi feito utilizando uma variante do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), chamada Índice de Vegetação Resistente à

Atmosfera (ARVI), proposto por Kaufman e Tanre (1992). Através do ARVI é possível determinar a densidade de fitomassa foliar fotossinteticamente ativa por unidade de área (quanto maior o índice, mais densa é a fitomassa verde). O índice aproveita, além da reflectância no comprimento de onda correspondente ao vermelho visível e ao infravermelho próximo, a reflectância no comprimento do azul visível.

As plantas fotossinteticamente ativas absorvem radiação solar na região do vermelho ao passo que refletem na região do infravermelho próximo (JENSEN, 2009). À medida que aumenta a quantidade de vegetação verde, aumenta a reflexão na banda do infravermelho próximo e diminui a reflexão na banda do vermelho fazendo com que o aumento da razão seja potencializado, realçando assim a vegetação (NOVO, 1989). No ARVI se tem uma autocorreção para os efeitos atmosféricos sobre a banda do vermelho utilizando a diferença entre a banda do vermelho e do azul para corrigir a radiância do vermelho, conforme a Equação 8 (KAUFMAN e TANRE, 1992).

$$ARVI = \frac{(NIR - [RED - Y * \{BLUE - RED\}])}{(NIR + [RED - Y * \{BLUE - RED\}])} \quad (\text{Eq.8})$$

Onde:

NIR = Reflectância no infravermelho Próximo

RED = Reflectância no vermelho

BLUE = Reflectância no azul

Y = Constante que compensa a presença de aerossóis atmosféricos

O valor da constante Y utilizada foi 1, conforme recomendado por Kaufman e Tanre (1992). Os autores descrevem que o ARVI sofre cerca de quatro vezes menos interferência de efeitos da atmosfera que o NDVI, principalmente em superfícies vegetadas, o que se mostra uma ótima ferramenta na aplicação deste trabalho, visto que cerca de 90% da área possui algum tipo de vegetação.

O cálculo do ARVI foi realizado no *software* QGIS, utilizando a ferramenta “calculadora raster”, utilizando as bandas espectrais do infravermelho próximo, do vermelho e do azul da imagem de satélite CBERS-4A.

O ARVI foi dividido em 3 classes de cobertura vegetal, de acordo com o valor do índice de vegetação, sendo os valores mais baixos referente à área com vegetação ausente, seguido por uma classe de vegetação rasteira e/ou esparsa e pela classe de vegetação densa.

A validação do produto gerado pelo ARVI é feita através de uma matriz de confusão, onde foram selecionados no total 150 pontos, 50 para cada classe do ARVI. Os pontos selecionados de forma automática no Plugin *AcATaMa* são comparados lado a lado com a imagem de satélite e é feita a verificação manual dos pontos de acordo com a interpretação do usuário, identificando quais pixels foram enquadrados corretamente e quais foram erroneamente. Por fim os resultados foram dispostos em uma matriz de erro, ou matriz de confusão, a partir da qual realizou-se o cálculo de acurácia do produto.

5.2.5 Aplicação do método pesos de evidência

Os pontos de treinamento foram destinados à atribuição dos pesos das classes de cada fator condicionante pelo método pesos de evidência, e os pontos de validação reservados para posterior etapa de validação do trabalho.

A metodologia deste trabalho foi feita de acordo com os trabalhos de Bonham-Carter *et al.* (1989) e Bonham-Carter (1994). Como mencionado anteriormente, a diferença entre a inferência bayesiana e o método pesos de evidência é que o último utiliza uma formulação logarítmica natural do teorema de Bayes. Com o ajuste ao logaritmo natural da relação de probabilidades condicionais, tem-se os ponderadores de Bayes (W^+ e W^-):

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(E|B)}{P(\bar{E}|B)} \right\}$$

$$W^- = \ln \left\{ \frac{P(E|\bar{B})}{P(\bar{E}|\bar{B})} \right\}$$

Os pesos de cada classe de fatores condicionantes são calculados de acordo com os valores dos ponderadores de Bayes (W^+ ou W^-). Então, o contraste (C) é calculado de acordo com a diferença entre os pesos positivos e negativos para cada classe das evidências analisadas, de acordo com a equação:

$$C = (W^+) - (W^-)$$

Onde C é o valor de contraste, W^+ o peso positivo e W^- o peso negativo.

5.2.6 Confecção do mapa de suscetibilidade à MGM

Após todos os fatores condicionantes terem sido reclassificados de acordo com os pesos de suas respectivas classes, todos fatores devidamente ponderados são somados na calculadora raster, dando origem ao mapa de suscetibilidade à MGM, onde os valores mais baixos indicam uma menor suscetibilidade à ocorrência de MGM e, do contrário, valores mais altos indicam uma suscetibilidade maior.

Por fim os valores de suscetibilidade são subdivididos em 5 classes: Muito baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta. Para a definição do intervalo de valores que abrange cada classe foi aplicado o método de quebras naturais de classificação, ou algoritmo de Jenks. O método busca minimizar a variância intraclases e maximizar a variância interclasses (GIRARDI, 2008 *apud* ZUCHERATO e FREITAS, 2011). De acordo com Zucherato e Freitas (2011), o método das quebras naturais é apoiado em um cálculo matemática para determinar o valor de seus intervalos. Para o cálculo dos valores dos intervalos pelo método do algoritmo de Jenks, inicialmente é feito um cálculo da soma dos desvios absolutos sobre a mediana da classe. Esses desvios correspondem a um erro, para o estabelecimento das quebras naturais da série de dados, ou seja, quanto menor for o resultado, mais acurada será a divisão das classes. Nesse método de classificação os dados com menor variação são agrupados, estabelecendo de maneira estatística os padrões espaciais dos dados utilizados (ZUCHERATO e FREITAS, 2011). Neste trabalho o cálculo foi feito através da ferramenta de classificação chamada quebras naturais (Jenks), no ArcGIS Pro.

5.2.7 Validação dos resultados

A validação do mapa de suscetibilidade à MGM foi realizada através dos métodos *receiver operating characteristic* (ROC) e *area under curve* (AUC). A curva ROC representa a qualidade de predição do modelo, baseado em sua habilidade de prever corretamente a ocorrência ou não-ocorrência de eventos pré-definidos (SHAHABI *et al.*, 2015). Basicamente consiste em um gráfico composto pela sensibilidade do modelo (razão dos dados corretamente classificados como positivos e o total de dados positivos) pela 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 próximos a 1 indicam sucesso do modelo adotado. Neste trabalho, a curva ROC e a AUC foram utilizadas para verificar a acurácia do mapa de suscetibilidade gerado (ANBALAGAN *et al.*, 2015).

6 RESULTADOS

6.1 INVENTÁRIO DE CICATRIZ DE MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA

Ao total, o inventário de cicatrizes de MGM conta com 283 cicatrizes, sendo 209 cicatrizes advindas do mapeamento realizado em produtos da SDS-SC (ortofotos, MDT e MDS sombreados) de 2010, 65 identificadas em imagem de satélite CBERS-4A, do ano de 2020 e 9 observadas em trabalho de campo realizado no ano de 2021. Muitas das cicatrizes identificadas remotamente nos produtos de 2010 puderam ser observadas na imagem de satélite de 2020, bem como em trabalho de campo, cobertas por vegetação, mas que apresentavam sinais de superfície remobilizada.

O mapa da Figura 20 exhibe a distribuição espacial dos pontos localizados na cabeceira de cada cicatriz de movimento de massa.

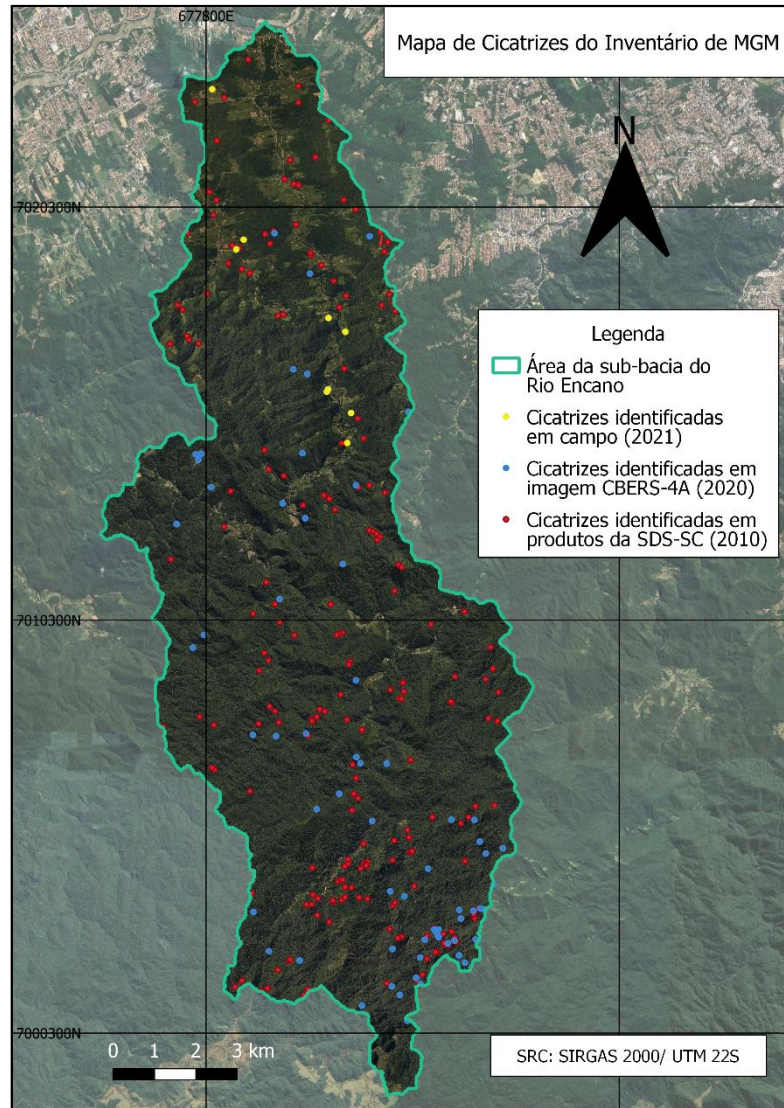


Figura 20 – Mapa de localização das cicatrizes de MGM discriminadas pela fonte de obtenção na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.

Conforme a Tabela 1, a área total de movimentos de massa na área de estudo é de cerca de 0,2 km², o que equivale a uma ocorrência de cerca de 2 movimentos de massa a cada km² da sub-bacia do Rio Encano. A tabela ainda traz dados como área média, máxima e mínima das cicatrizes de MGM, além do perímetro total e médio.

Tabela 1 – Dados relacionados as cicatrizes dos movimentos de massa mapeados na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.

Parâmetros analisados	Valor
Número total de MGM	283
Área da sub-bacia (Km ²)	139,1
Área total de MGM (Km ²)	0,2
Densidade de MGM (MGM/Km ²)	2
Maior área MGM (m ²)	7596,5
Menor área MGM (m ²)	9,3
Área média MGM (m ²)	676,7
Perímetro total MGM (m)	30782,2
Perímetro médio MGM (m)	108,4

A Figura 21 expõe a ocorrência de um movimento de massa de grandes proporções no quadro “A”, o qual possui comprimento superior a 330 m e área de 6712 m². No quadro “B” é exposta em imagem do satélite Maxar Technologies do ano de 2022, uma área localizada na região sudeste da sub-bacia, entre os municípios de Indaial e Blumenau que foi fortemente assolada por movimentos de massa.

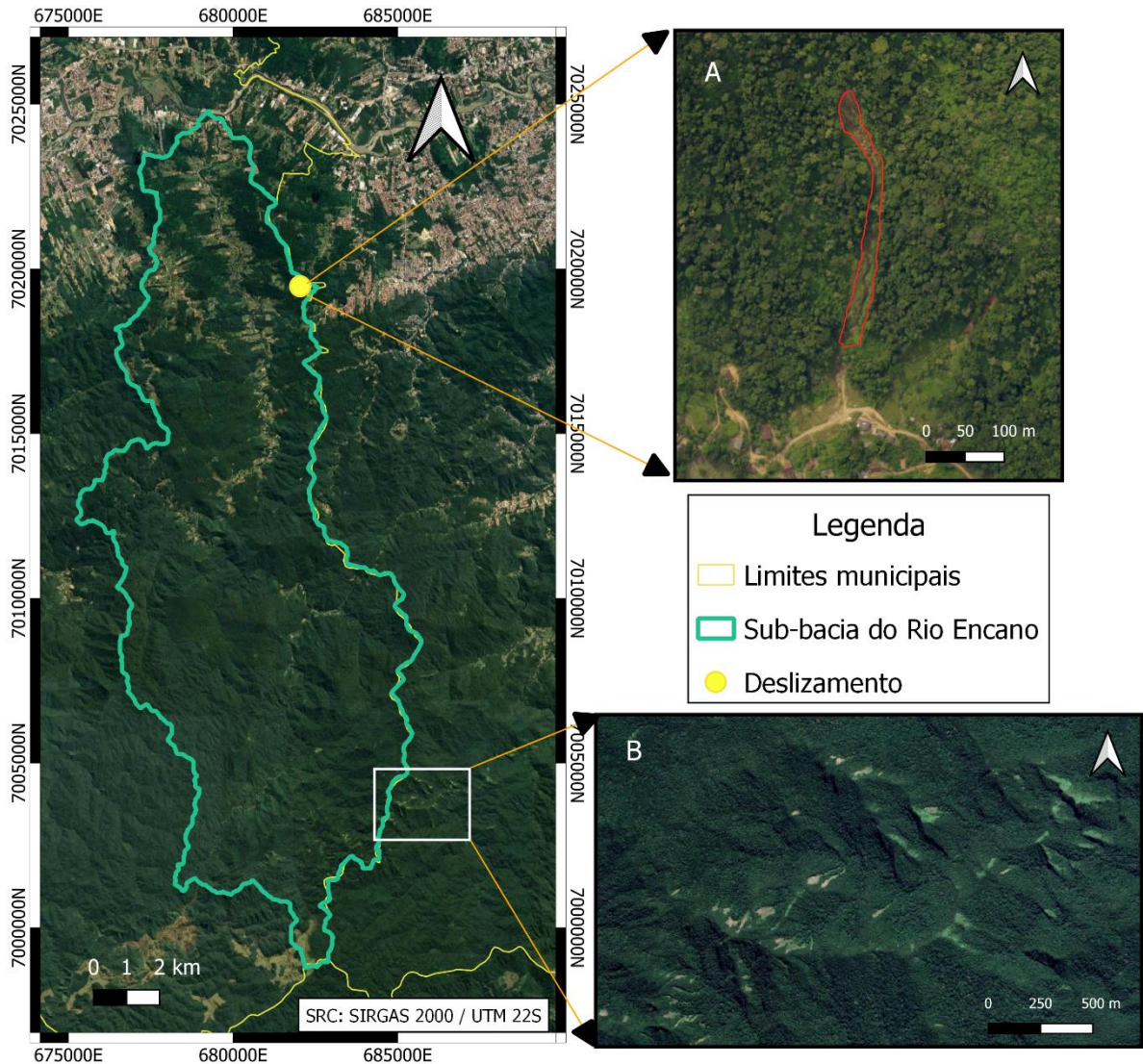


Figura 21 – Mapa mostrando ocorrência de movimentos gravitacionais de massa ocorridos na área de estudo e proximidades. A) Deslizamento de grandes proporções identificado em ortofoto de 2010, localizado a nordeste da sub-bacia do Rio Encano. B) Imagem do satélite Maxar Technologies datada de 2022 ilustrando diversas ocorrências de MGM ocorridos entre os municípios de Indaial e Blumenau, na região sudeste da sub-bacia.

6.1.1 Movimentos gravitacionais de massa identificados em trabalho de campo

Durante os dias de campo realizados na área de estudo, foram observadas 09 novas cicatrizes de movimento gravitacional de massa, e a confirmação da ocorrência de algumas cicatrizes de MGM identificadas remotamente e que fazem parte do inventário. Dentre as novas cicatrizes, quatro se encontram em rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina, o restante em rochas sedimentares da Bacia do Itajaí (Figura 22).

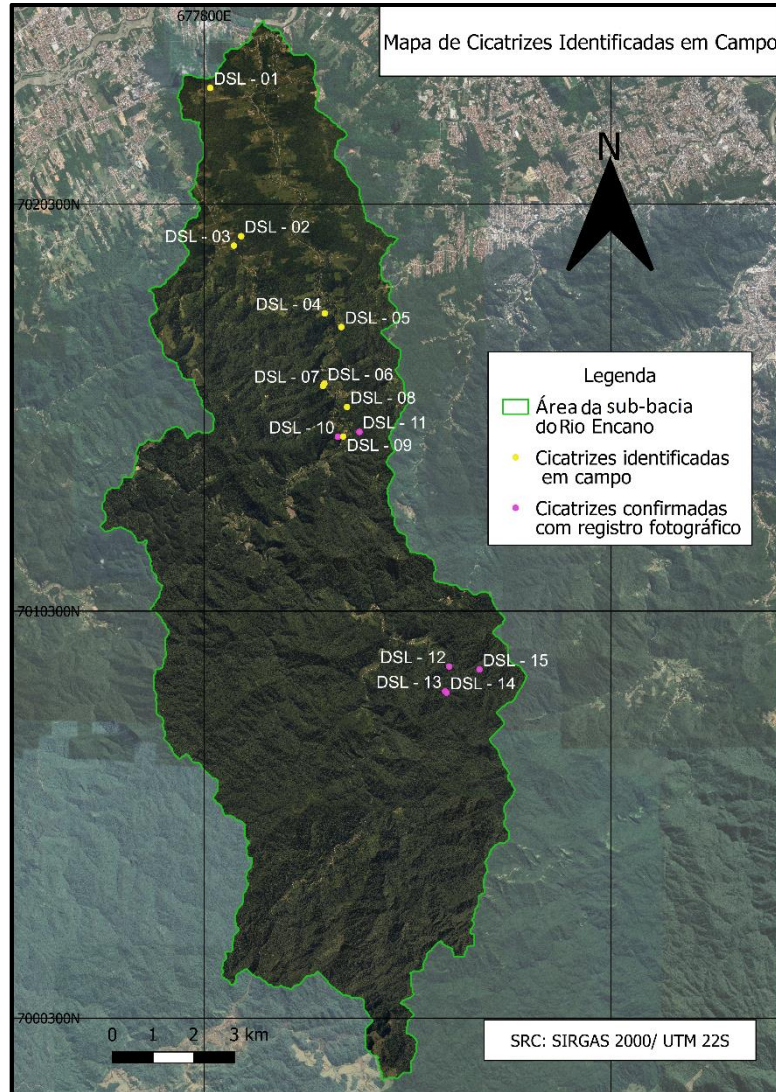


Figura 22: Mapa de localização das cicatrizes de movimento de massa identificadas em campo na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.

Grande parte dos movimentos de massa identificados em campo (Figura 23) tiveram um controle forte da ação antrópica, se desenvolvendo, na maioria dos casos em cortes de estrada íngremes ou em terrenos de pastagem com vegetação rasteira e/ou esparsa.



Figura 23: Movimentos gravitacionais de massa identificados em trabalho de campo. A) Escorregamento Translacional em beira de estrada (DSL-06). B e F) Rastejos em estágio avançado em áreas de pastagem (DSL-05 e DSL-10). C e E) Escorregamento de grande proporção em beira de estrada, ocorrido em siltitos e argilitos da Bacia do Itajaí, marcando indícios de queda de rocha mesmo após sua ocorrência (DSL-07). D) Escorregamento em beira de estrada ocorrido em ritmitos da Bacia do Itajaí (DSL-10).

Algumas cicatrizes de movimentos de massa identificados em ortofotos da SDS-SC do ano de 2010 puderam ser reconhecidas onze anos depois, em trabalho de campo (Figura 24). Em geral as cicatrizes já se apresentavam dominadas por vegetação secundária e de

pequeno porte, em relação ao seu entorno, com destaque para o crescimento de samambaias na área com solo remobilizado.

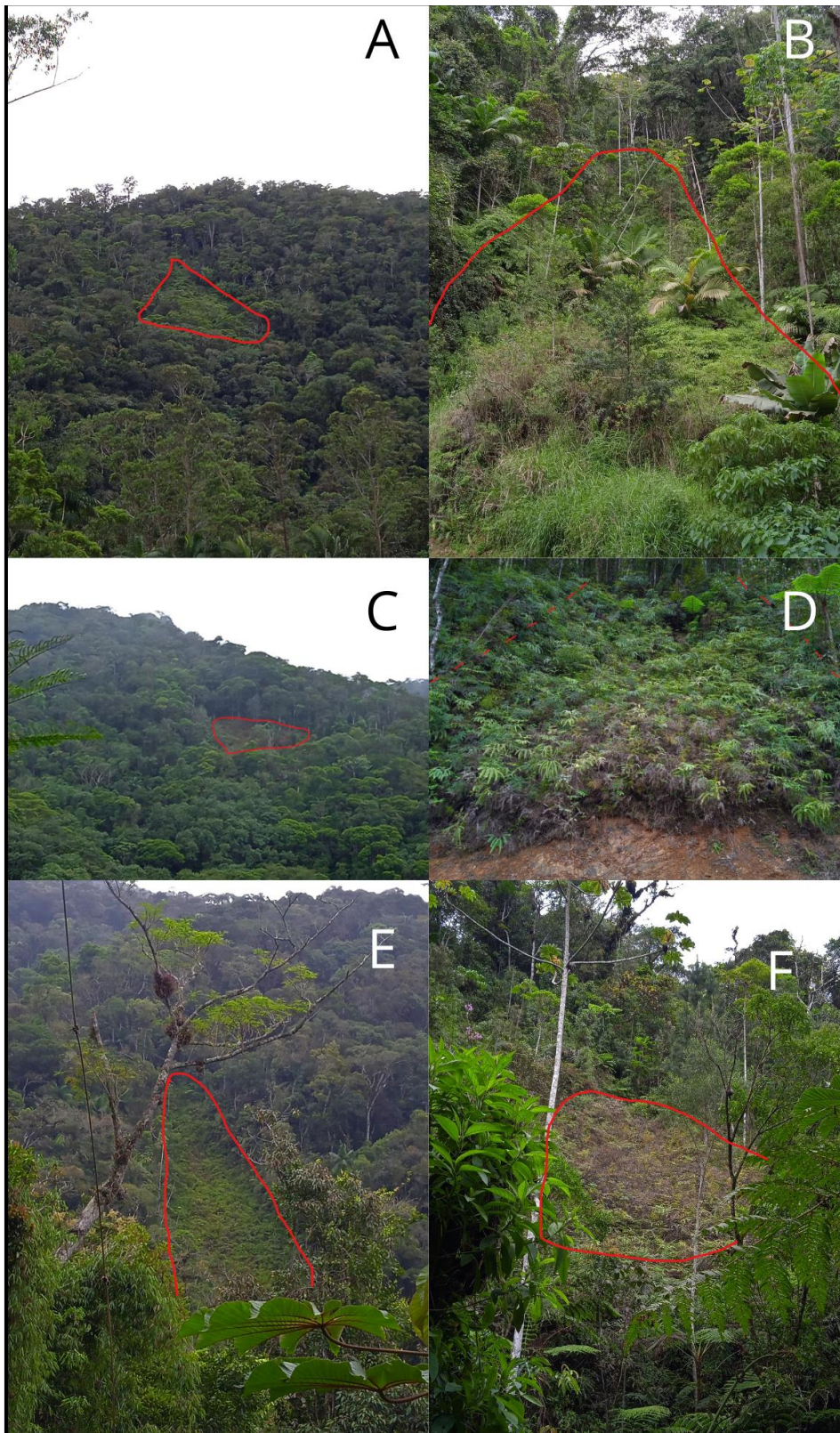


Figura 24: Cicatrizes de MGM mapeadas em produtos obtidos por sensores remotos e reconhecidas em campo. A, B, E e F) Cicatrizes encontradas ao longo de uma trilha na região sul da área de estudo (DSL-15, DSL-14,

DSL-13 e DSL- 12). C) Cicatriz vista à distância de estrada em zona rural (DSL-11). D) Cicatriz próxima ao caminho de uma trilha, exibindo a vegetação secundária (samambaias)

6.1.2 Pontos de treinamento e validação

Os movimentos de massa que compõe o inventário foram divididos em pontos de treinamento e validação. Dos 283 pontos de cicatrizes do inventário, 70% (198 movimentos de massa) foram destinadas ao cálculo dos pesos das classes dos fatores condicionantes (treinamento) e os outros 30% (85 movimentos de massa) foram designados à validação dos resultados (Figura 25).

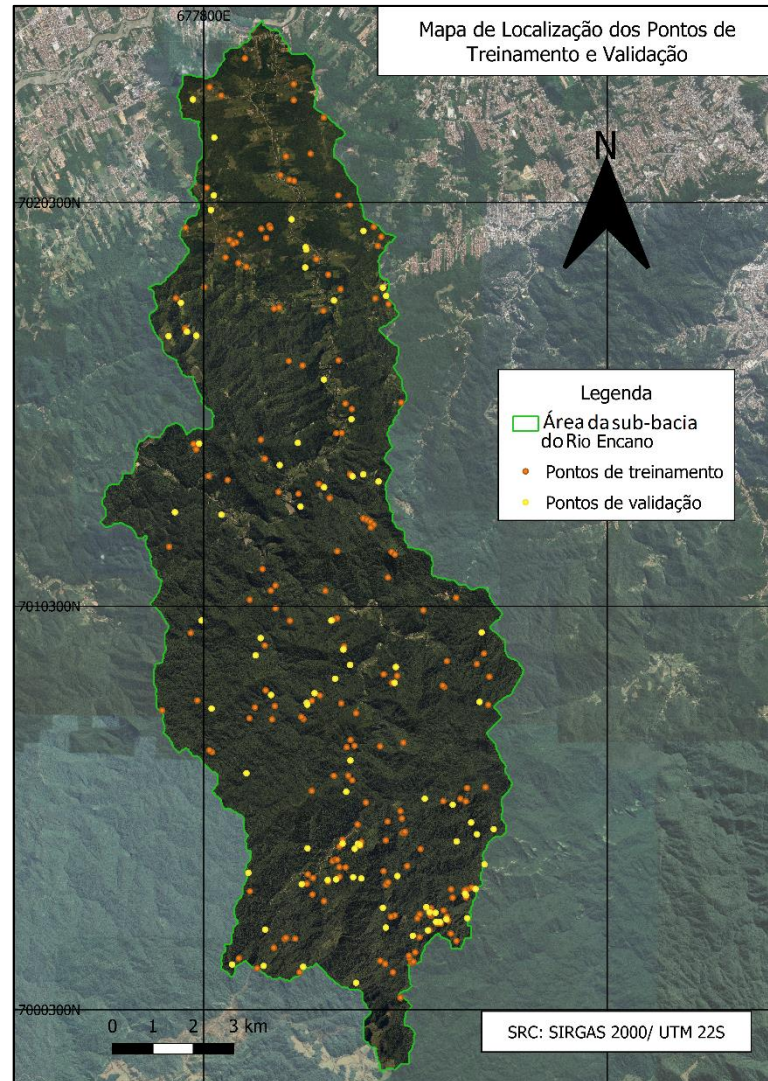


Figura 25 Mapa com a distribuição dos pontos de treinamento e validação localizados na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.

6.2 ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES

Foram considerados seis fatores condicionantes a movimento gravitacional de massa neste trabalho, a seguir será descrito cada um deles e apresentado os pesos $W+$ e $W-$ para cada classe.

6.2.1 Unidades litoestratigráficas

As classes de litologia deste trabalho correspondem às unidades litoestratigráficas do mapa geológico de Santa Catarina (Wildner *et al.*, 2014). Ao total, a área da sub-bacia do rio

Encano é constituída por 14 unidades distintas conferindo, portanto, 14 classes de litologia, conforme a Figura 26.

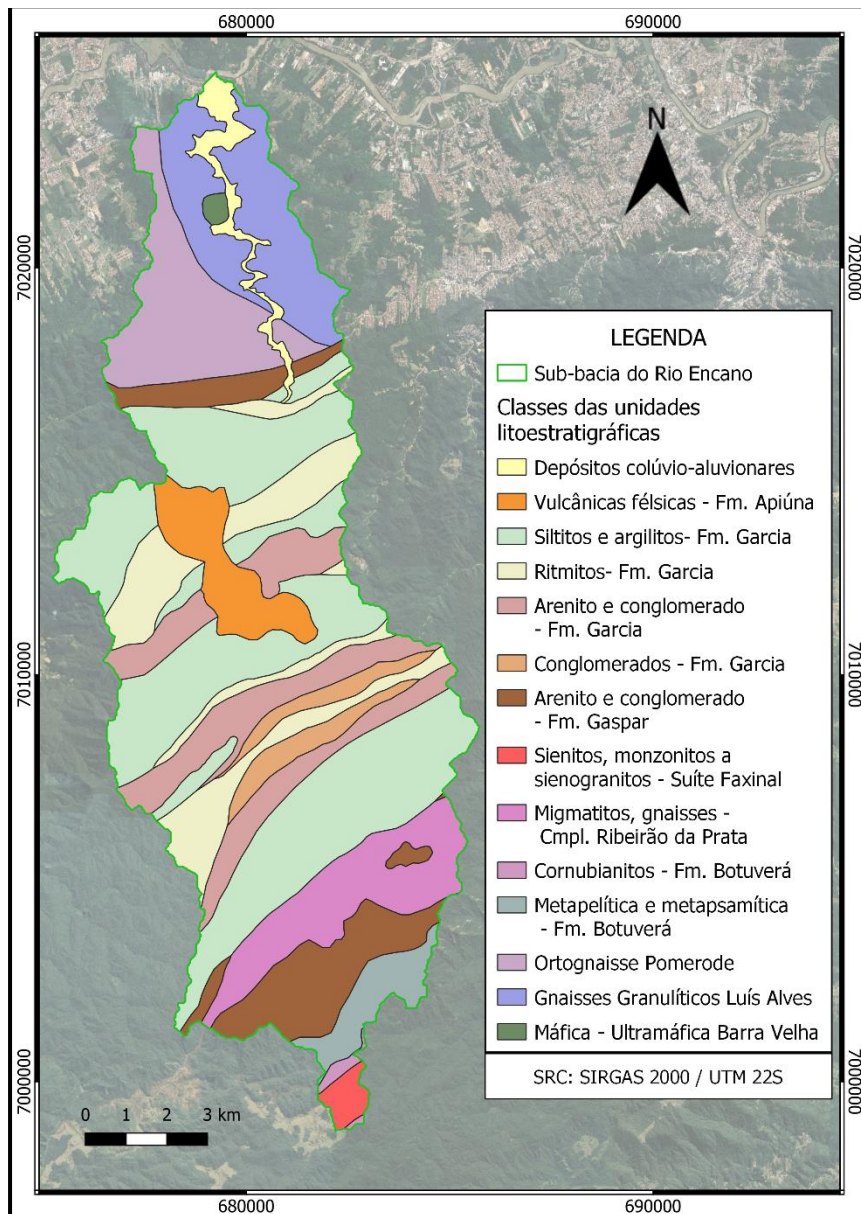


Figura 26 – Mapa de classes de unidades litoestratigráficas utilizadas para a análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.

Através da Tabela 2 é possível observar as relações espaciais entre os pontos de localização de MGM e as classes da evidência unidade litoestratigráfica.

Dentre as 14 unidades litoestratigráficas consideradas, foi observada a ocorrência de movimento de massa em 12 unidades e, ausência de MGM na unidade litológica máfica e ultramáfica Barra Velha e nos sienitos, monzonitos e sienogranitos da Suíte Faxinal.

As unidades que apresentaram maior ocorrência de MGM foram os siltitos e argilitos da Formação Garcia (25,3%), seguido pelos migmatitos e gnaisses do Complexo Ribeirão da Prata (16,2%) e pelos metapelitos e metapsamitos da Formação Botuverá (14,2%).

Em virtude da área que as classes ocupam e da ocorrência de MGM nas mesmas, os pesos (W+) obtidos do maior para o menor valor são: as unidades metapelítica e metapsamítica da Formação Botuverá, Complexo Ribeirão da Prata e Cornubianitos da Formação Botuverá. Em relação ao valor de contraste (C), os valores compreendem a mesma ordem de pesos listada anteriormente, indicando uma boa relação entre respectivas classes e os movimentos de massa.

Tabela 2 – Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos (W+ e W-) e valor de contraste (C) das classes da evidência unidades litoestratigráficas.

CLASSE	ÁREA (PIXEL)	ÁREA (%)	PONTOS DE TREINAMENT O	PONTOS DE TREINAMENTO (%)	W+	W-	C
Máfica - Ultramáfica Barra Velha	103242	0,30	0	0,0	0,0000	0,0000	0,000
Gnaisses Granulíticos Luís Alves	3150894	9,06	18	9,1	0,0036	-0,0004	0,004
Ortognaisse Pomerode	3014687	8,67	20	10,1	0,1531	-0,0158	0,169
Metapelítica e metapsamítica - Fm. Botuverá	924988	2,66	29	14,6	1,7062	-0,1314	1,838
Cornubianitos - Fm. Botuverá	114570	0,33	1	0,5	0,4275	-0,0018	0,429
Migmatitos, gnaisses - Cmpl. Ribeirão da Prata	2548292	7,33	32	16,2	0,7912	-0,1002	0,891
Sienitos, monzonitos a sienogranitos - Suíte Faxinal	295602	0,85	0	0,0	0,0000	0,0000	0,000
Arenito e conglomerado - Fm. Gaspar	2930961	8,43	15	7,6	-0,1064	0,0092	-0,116
Conglomerados - Fm. Garcia	1074407	3,09	7	3,5	0,1350	-0,0046	0,140
Ritmitos - Fm. Garcia	3539356	10,18	9	4,5	-0,8058	0,0608	-0,867
Arenito e conglomerado - Fm. Garcia	3760713	10,81	11	5,6	-0,6658	0,0573	-0,723
Siltitos e argilitos - Fm. Garcia	11032905	31,72	50	25,3	-0,2280	0,0905	-0,318
Vulcânicas félsicas - Fm. Apiúna	1568745	4,51	5	2,5	-0,5799	0,0206	-0,601
Depósitos colúvio-aluvionares	724822	2,08	1	0,5	-1,4173	0,0160	-1,433

6.2.2 Distância das principais estruturas geológicas

As classes de distância das principais estruturas geológicas (falhas, fraturas e zonas de cisalhamento) foram definidas em intervalos de 100 m até 500 m de distância, além de uma classe englobando distância maiores que 500 m (Figura 27).

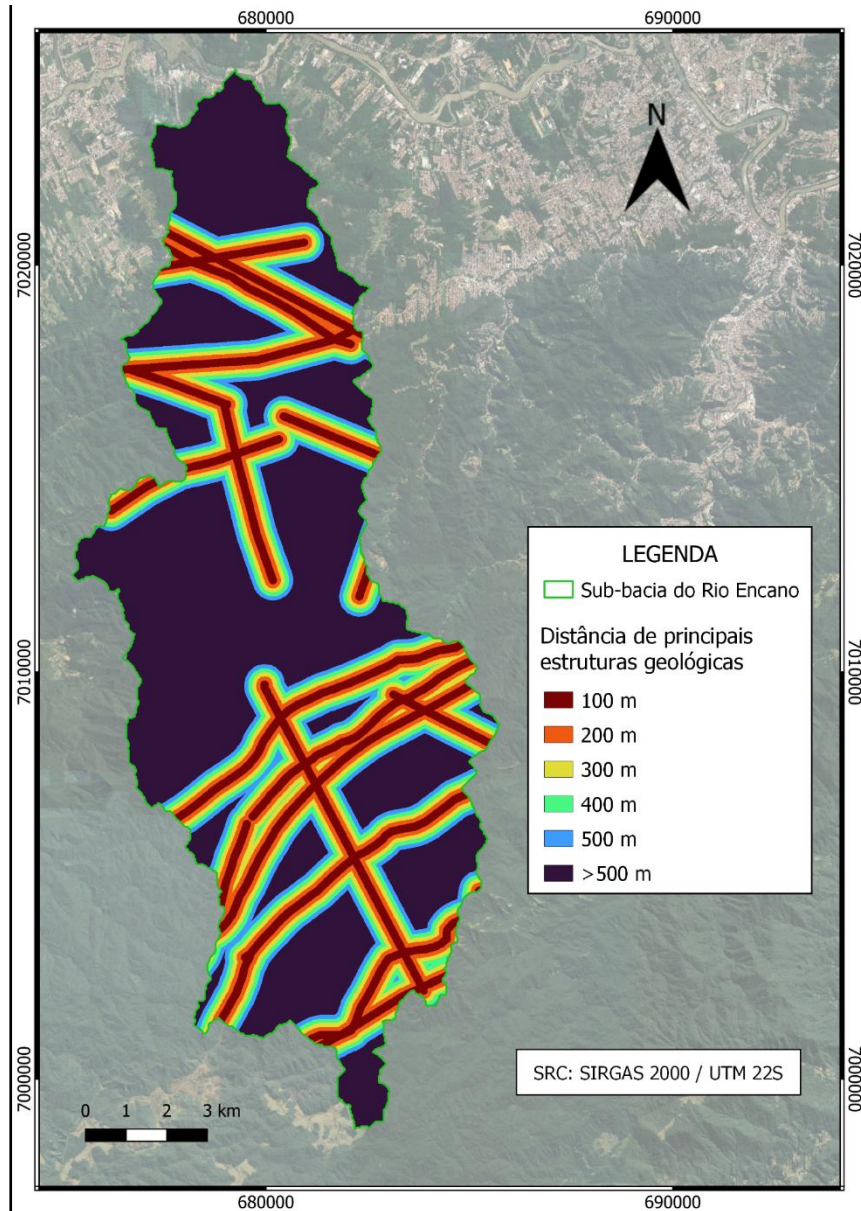


Figura 27 – Mapa das classes de distância de principais estruturas geológicas utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano, Indaial, SC.

De acordo com a Tabela 3, e a Figura 27, a maior parte da área de estudo compreende distâncias de estruturas maiores que 500 m (51,58%), o que lhe confere maior ocorrência de movimentos de massa, sendo 48,42% da área ocupada pelas classes de

distâncias inferiores a 500m. Percebe-se também que a ocorrência de MGM tende a diminuir, à medida que a distância das estruturas aumenta, compreendendo tanto pesos W+ quanto valores de contraste (C) maiores nas classes de distâncias de 100 m e 200 m. Apesar da classe de distâncias maiores que 500 m ter o maior número de MGM, foi a classe que representou menor relação com ocorrência de MGM.

Tabela 3 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos (W+ e W-) e valor de contraste (C) das classes da evidência distância de principais estruturas geológicas.

CLASSE	ÁREA (PIXEL)	ÁREA (%)	PONTOS DE TREINAMENT O	PONTOS DE TREINAMENTO (%)	W+	W-	C
100 m	4250933	12,23	33	16,7	0,3098	-0,0519	0,362
200 m	3805409	10,94	32	16,2	0,3898	-0,0604	0,450
300 m	3303572	9,50	23	11,6	0,2009	-0,0236	0,225
400 m	2885465	8,30	21	10,6	0,2453	-0,0255	0,271
500 m	2588597	7,45	13	6,6	-0,1257	0,0095	-0,135
>500 m	17934616	51,58	76	38,4	-0,2956	0,2411	-0,537

6.2.3 Declividade

A declividade da sub-bacia do Rio Encano varia de 0°, a norte da área, onde se tem o processo de urbanização mais acentuado, até 83° na porção sul da área. As classes de declividade foram divididas em intervalos de 10°, conferindo 9 classes totais.

Conforme mostra a Tabela 4 e a Figura 28, a classe de declividade que ocupa a maior área da sub-bacia é a de 20-30° (38,4%), seguida da classe de 10-20° (28,15%) e 30-40° (16,85%). Apesar disso, a classe de 30-40° é a que mais apresenta ocorrências de MGM, com 40,9%, seguida da classe de 20-30° com 31,8%, compreendendo juntas 144 dos 198 pontos de treinamento.

As classes que correspondem a declividades superiores a 60° são mais escassas, e contém ausência de movimentos de massa, não apresentando influência na ocorrência de MGM. Em contrapartida a classe de 50-60° foi a que obteve maior peso (W+) e valor de contraste (C), devido a ocorrência de 05 MGM's em uma área de 0,35% da sub-bacia. Em seguida as classes de 40-50° e 30-40° também obtiveram valores de peso e contraste altos. Apesar da classe de 20-30° possuir boa parte das ocorrências de MGM o seu peso foi negativo

e o valor de contraste indica que não exerce grande influência nas ocorrências. Além disso, os valores de contraste indicam que o aumento da declividade até o valor de 60° gera um aumento correspondente no grau de suscetibilidade a movimentos de massa.

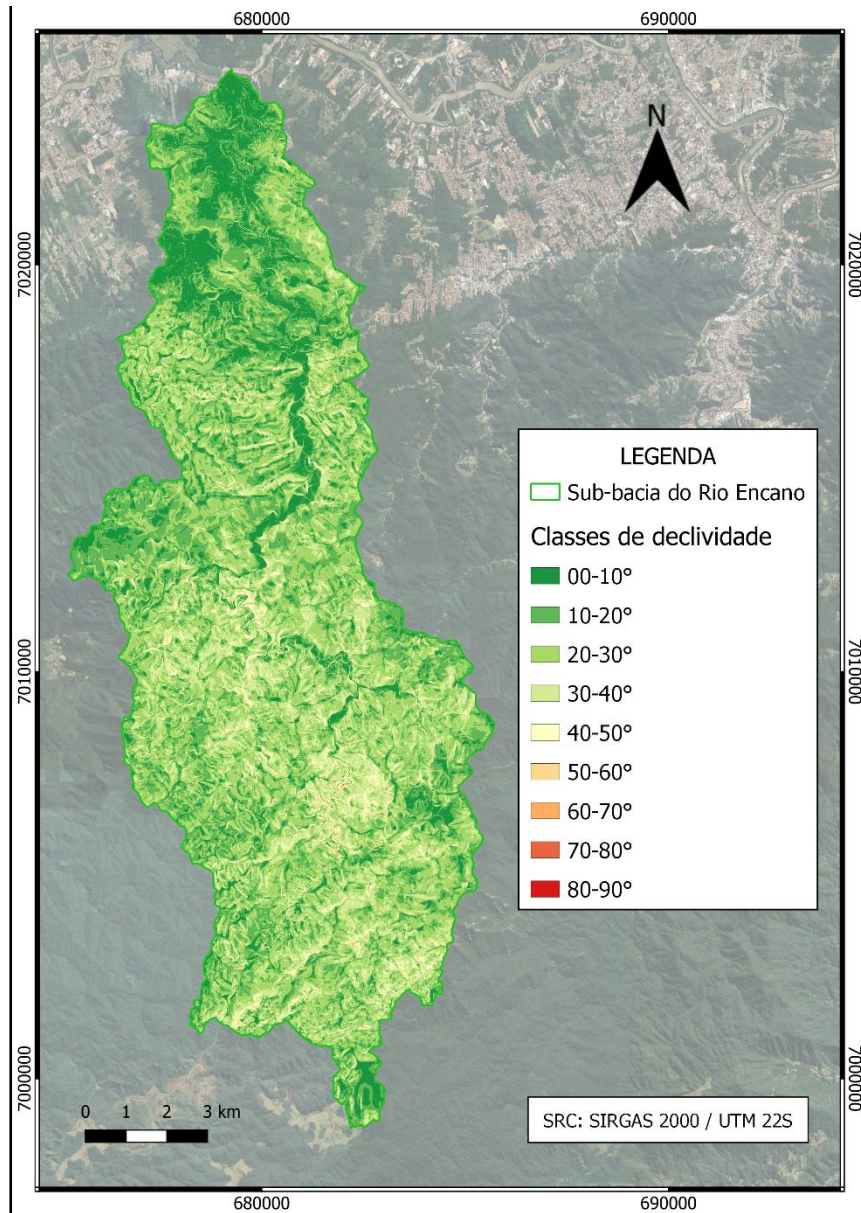


Figura 28 - Mapa das classes de declividade utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano.

Tabela 4 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos (W+ e W-) e valor de contraste (C) das classes da evidência declividade.

CLASSE	ÁREA (PIXEL)	ÁREA (%)	PONTOS DE TREINAMENTO	PONTOS DE TREINAMENTO (%)	W+	W-	C
0-10°	4495863	12,93	3	1,5	-2,1437	0,1231	-2,267
10-20°	9791785	28,15	22	11,1	-0,9296	0,2128	-1,142
20-30°	13508560	38,84	63	31,8	-0,1993	0,1086	-0,308
30-40°	5859756	16,85	81	40,9	0,8872	-0,3416	1,229
40-50°	984734	2,83	24	12,1	1,4543	-0,1005	1,555
50-60°	120954	0,35	5	2,5	1,9827	-0,0221	2,005
60-70°	17620	0,05	0	0,0	0	0	0
70-80°	4562	0,01	0	0,0	0	0	0
80-90°	221	0,00	0	0,0	0	0	0

6.2.4 Orientação das encostas

As classes de orientação das encostas foram divididas em pontos cardeais e colaterais, concedendo 8 classes totais (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste), conforme mostra o mapa da Figura 29.

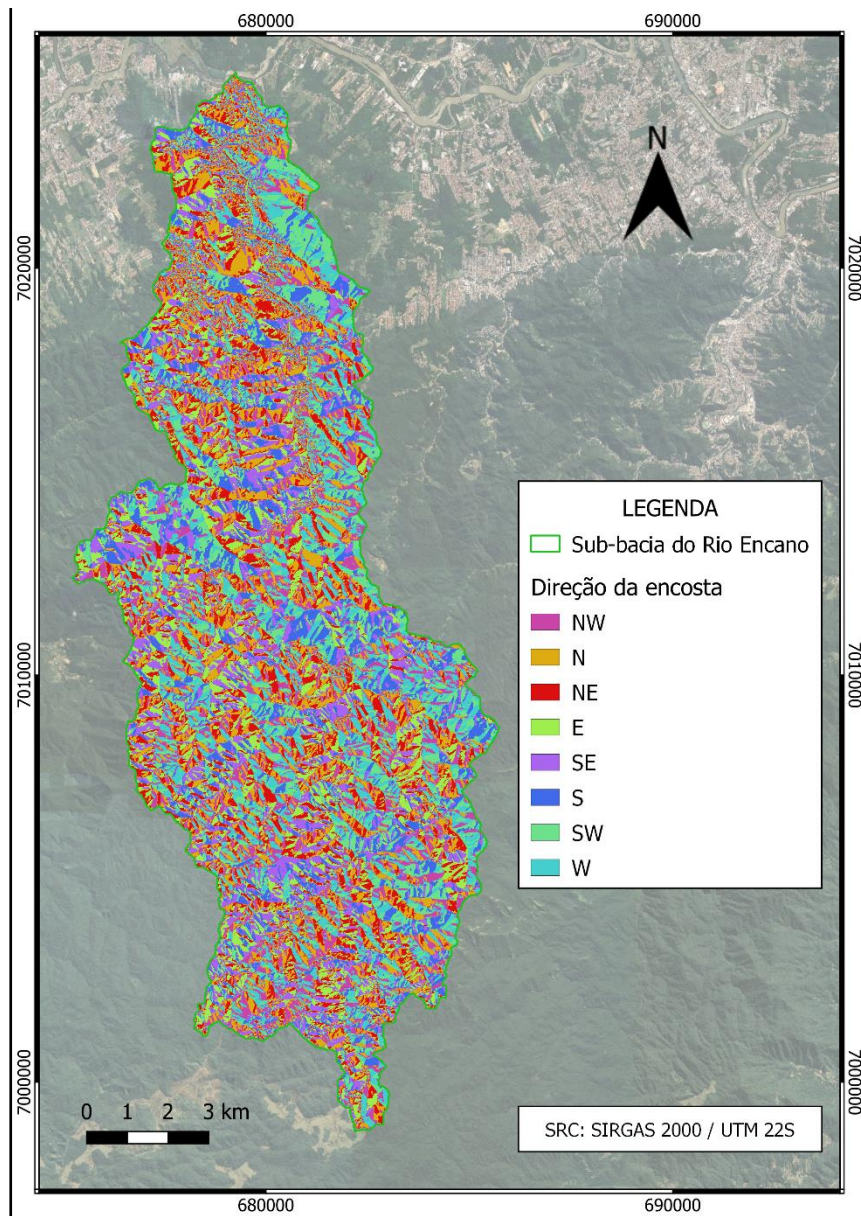


Figura 29 - Mapa das classes de orientação das encostas utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano do Rio Encano, Indaial, SC.

De acordo com a Tabela 5, as classes de orientação de encostas voltadas a norte ocupam maior parte da área e as faces voltadas a sul ocupam a menor área.

Quase 60% dos movimentos de massa ocorrem em faces de encostas voltadas para NW a NE, com destaque para as orientações NE e N, com maior quantidade de MGM e também com maiores pesos (W^+) e valores de contraste (C). Enquanto as faces de encostas voltadas para SW a SE obtiveram as menores correlações com ocorrências de MGM (Figura 28).

Tabela 5 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos (W+ e W-) e valor de contraste (C) das classes da evidência orientação das encostas.

CLASSE	ÁREA (PIXEL)	ÁREA (%)	PONTOS DE TREINAMENT O	PONTOS DE TREINAMENTO (%)	W+	W-	C
NW	4458540	12,82	28	14,1	0,0983	-0,0153	0,114
N	5047754	14,51	44	22,2	0,4261	-0,0945	0,521
NE	4547430	13,07	46	23,2	0,5750	-0,1243	0,699
E	4446469	12,78	28	14,1	0,1010	-0,0157	0,117
SE	4006902	11,52	5	2,5	-1,5177	0,0968	-1,615
S	3734022	10,73	9	4,5	-0,8594	0,0670	-0,926
SW	3953316	11,37	11	5,6	-0,7158	0,0635	-0,779
W	4589622	13,19	27	13,6	0,0329	-0,0051	0,038

6.2.5 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal foi dividida em 3 classes com base nos valores do Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI), sendo elas: Ausência de vegetação, vegetação rasteira e/ou esparsa e vegetação densa. A classe que mais predomina na área da sub-bacia do Rio Encano é a classe vegetação densa, com cerca de 90% da área, seguida pela classe vegetação rasteira e/ou esparsa e pela classe ausência de vegetação (Figura 30).

Em geral, a região norte e central da área são as que mais concentram as classes de vegetação ausente e de vegetação rasteira/esparsa, devido à ocupação urbana ocorrer em terrenos planos e de baixa declividade, mais próximas às planícies aluviais dos rios. Embora menos frequente, locais com ausência de vegetação e, principalmente com vegetação rasteira/esparsa são encontrados em outras porções da área de estudo onde se tem maiores declividades, sobretudo em áreas destinadas à pecuária e à silvicultura.

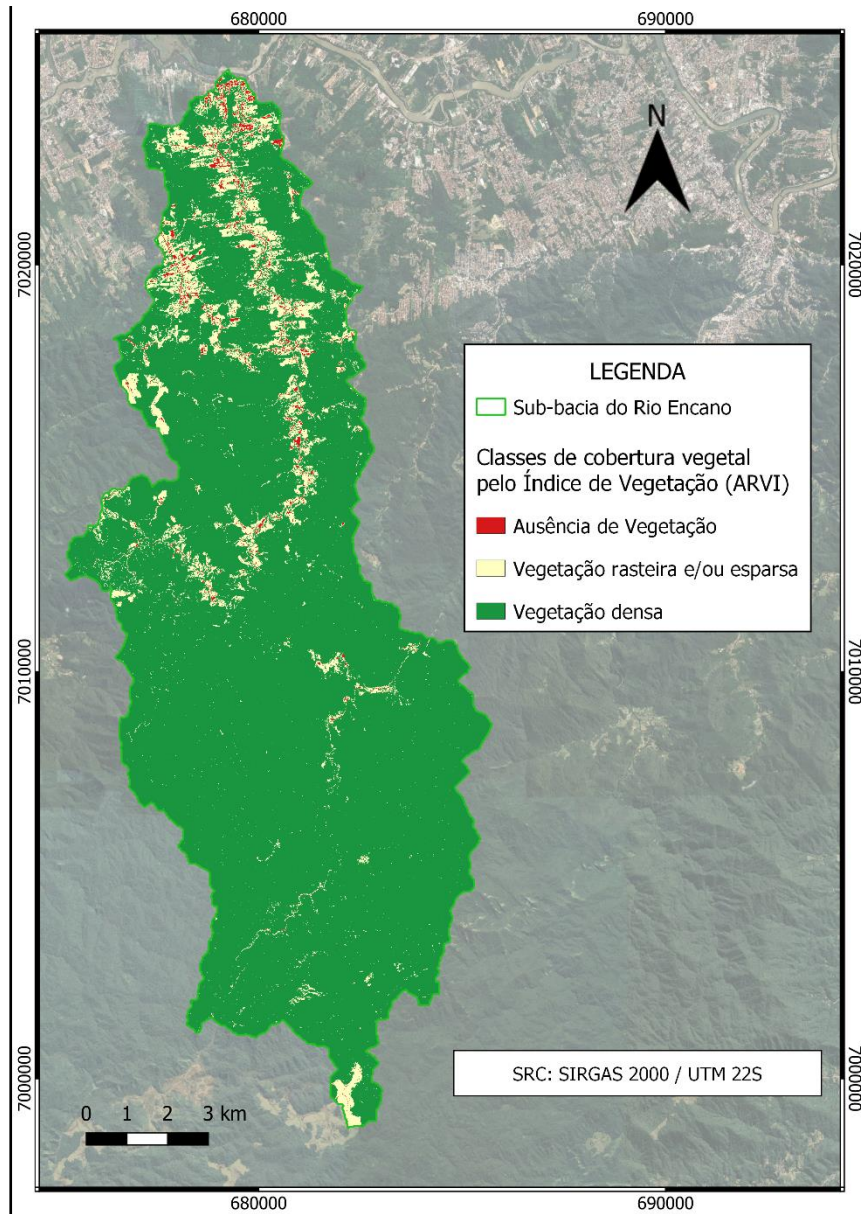


Figura 30 - Mapa das classes de cobertura vegetal utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano.

Cerca de 64% dos movimentos de massa dos pontos de treinamento ocorrem em áreas com vegetação densa, conferindo o menor peso dentre as classes de cobertura vegetal, enquanto as classes de vegetação rasteira/esparsa e de ausência de vegetação correspondem a quase 36%, conferindo a estas últimas duas classes pesos ($W+$) e valores de contraste (C) maiores (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos (W+ e W-) e valor de contraste (C) das classes da evidência Cobertura Vegetal.

CLASSE	ÁREA (PIXEL)	ÁREA (%)	PONTOS DE TREINAMENTO O	PONTOS DE TREINAMENTO (%)	W+	W-	C
Ausência de Vegetação	373333	1,07	9	4,5	1,4434	-0,0357	1,479
Vegetação Rasteira e/ou Esparsa	2951819	8,49	62	31,3	1,3056	-0,2869	1,593
Vegetação Densa	31458383	90,44	127	64,1	-0,3436	1,3221	-1,666

A validação da classificação de cobertura vegetal foi realizada através da matriz de erro ou matriz de confusão, onde foi obtida uma acurácia de 85%, conferindo uma boa fidelidade dos resultados (Tabela 7).

Tabela 7 - Matriz de erro de classificação (matriz de confusão).

		Valor previsto (Imagem CBERS-4A)				
		1 Ausência de vegetação	2 Vegetação rasteira e/ou	3 Vegetação densa	Total	
Valor verdadeiro	1 Ausência de vegetação	43	6	1	50	0,86
	2 Vegetação rasteira e/ou esparsa	5	37	8	50	0,74
	3 Vegetação densa	1	2	47	50	0,94
Total		49	45	56	150	
		0,88	0,82	0,84		Acurácia total: 0,85

6.2.6 Altitude

As altitudes da sub-bacia do Rio Encano variam de 31 a 1.008 metros, com pontos em altitude mais baixa localizados na região norte, na confluência dos rios Encano e Itajaí-Açu, e pontos em altitude mais alta na porção sul da área, conforme ilustrado na Figura 31.

Cerca de 70% da área se encontram entre 200 e 700 metros., com destaque para a classe de 300-400 m que possui a maior representatividade e se concentra por toda a porção central da área (Tabela 8).

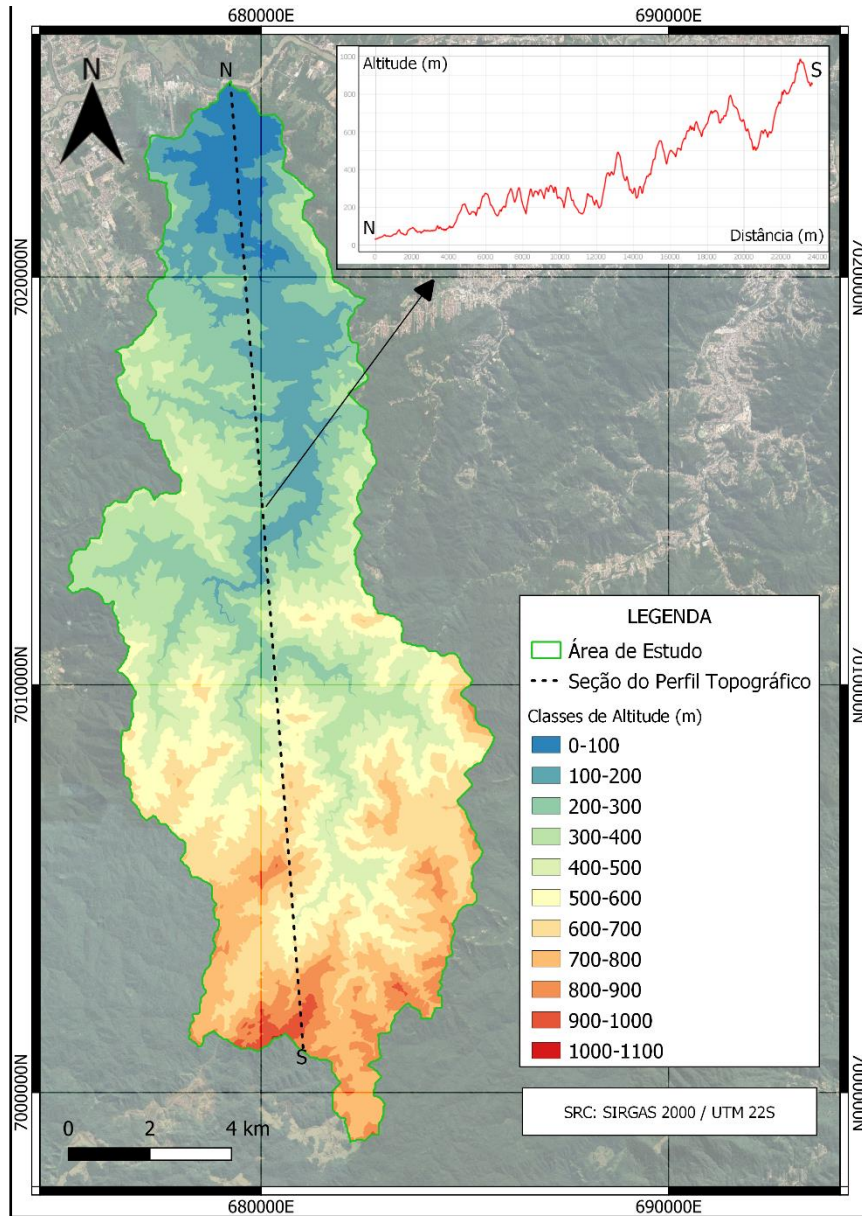


Figura 31 - Mapa das classes de altitude utilizadas na análise de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano.

As classes de altitude mais extremas, tanto as mais baixas quanto as mais altas foram as que menos apresentaram ocorrências de MGM, concentrando as ocorrências em altitudes médias.

As classes que mostraram maiores correlações com a ocorrência de MGM foram, as classes de 800-900 m, com maior peso (W+) e valor de contraste (C), seguida pela classe de 900-1000 m e de 500-600 m, indicando maior grau de suscetibilidade às altitudes mais

elevadas, exceto à classe de 1000-1100 m, pelo fato de não possuir representatividade na área e, portanto, correlação nula com a ocorrência de MGM.

Tabela 8 - Valores de área em pixel e porcentagem, pontos de treinamento em número e porcentagem, pesos (W+ e W-) e valor de contraste (C) das classes da evidência altitude.

CLASSE	ÁREA (PIXEL)	ÁREA (%)	PONTOS DE TREINAMENTO O	PONTOS DE TREINAMENTO (%)	W+	W-	C
0-100 m	1430619	4,11	6	3,0	-0,3055	0,0112	-0,317
100-200 m	3693739	10,62	15	7,6	-0,3377	0,0335	-0,371
200-300 m	5368307	15,43	31	15,7	0,0144	-0,0026	0,017
300-400 m	5753698	16,54	19	9,6	-0,5445	0,0799	-0,624
400-500 m	4778291	13,74	22	11,1	-0,2121	0,0300	-0,242
500-600 m	4440652	12,77	35	17,7	0,3254	-0,0579	0,383
600-700 m	4524332	13,01	22	11,1	-0,1575	0,0216	-0,179
700-800 m	3262292	9,38	17	8,6	-0,0883	0,0087	-0,097
800-900 m	1298413	3,73	28	14,1	1,3320	-0,1144	1,446
900-1000 m	229939	0,66	3	1,5	0,8295	-0,0086	0,838
1000-1100 m	3773	0,01	0	0,0	0,0000	0,0000	0,000

6.3 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO GRAVITACIONAL DE MASSA

O mapa de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa gerado pelo método peso de evidência caracteriza-se por apresentar um intervalo de valores entre -6,0 a 7,3. Os valores foram divididos em cinco classes de suscetibilidade a MGM com base no algoritmo *Jenks* em: Muito baixa (-6,0 a -2,7), baixa (-2,7 a -1,4), moderada (-1,4 a -0,3), alta (-0,3 a 1,2) e muito alta (1,2 a 7,3) (Figura 33). A classe mais predominante na área de estudo foi a classe de moderada suscetibilidade, ocupando 32%, que se apresenta distribuída por toda a extensão da sub-bacia do Rio Encano. As classes de suscetibilidade muito baixa e baixa apresentam, respectivamente 13% e 28% de ocupação da sub-bacia do Rio Encano, enquanto que, as classes de alta e muito alta suscetibilidade ocupam, na devida ordem 22% e 6% (Figura 32).

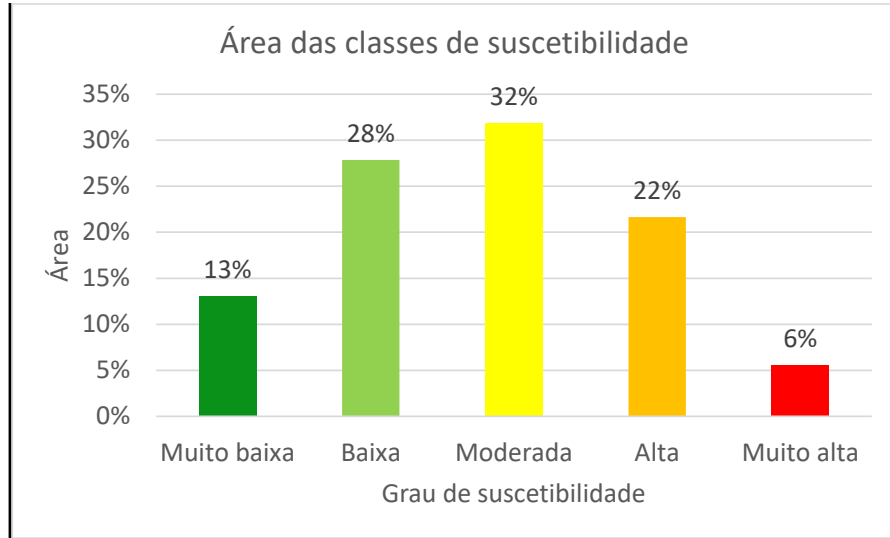


Figura 32 - Distribuição de áreas das classes de suscetibilidade a MGM.

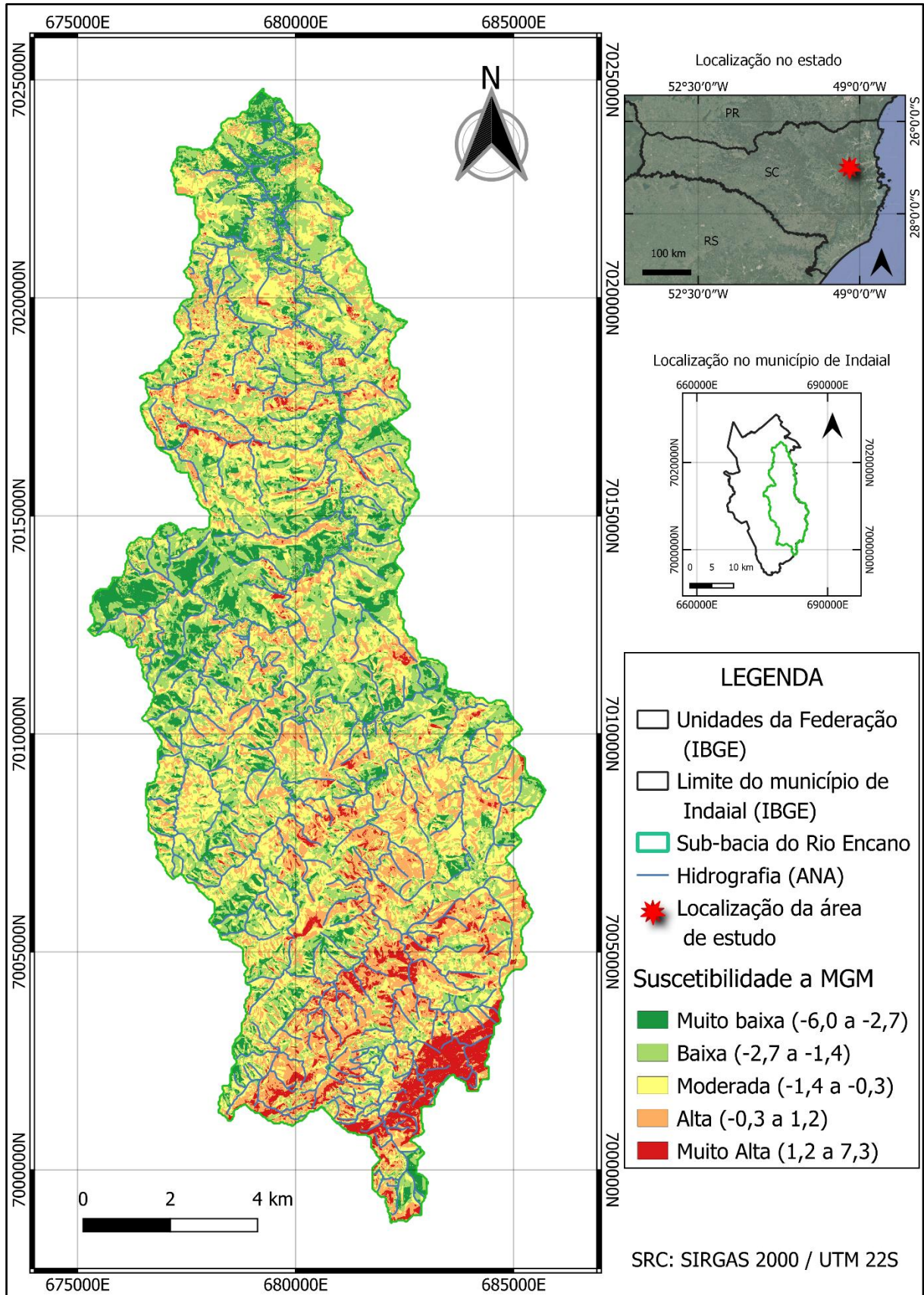


Figura 33 – Mapa de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio Encano gerado pelo método peso de evidência (WofE).

A validação do modelo previsional de suscetibilidade a MGM na sub-bacia do Rio Encano pelo método *Receiver Operating Characteristic* (ROC) resultou em valores de *area under curve* (AUC) de 0,79, representando uma acurácia de 79%. A curva ROC para validação do mapa está disposta na Figura 34.

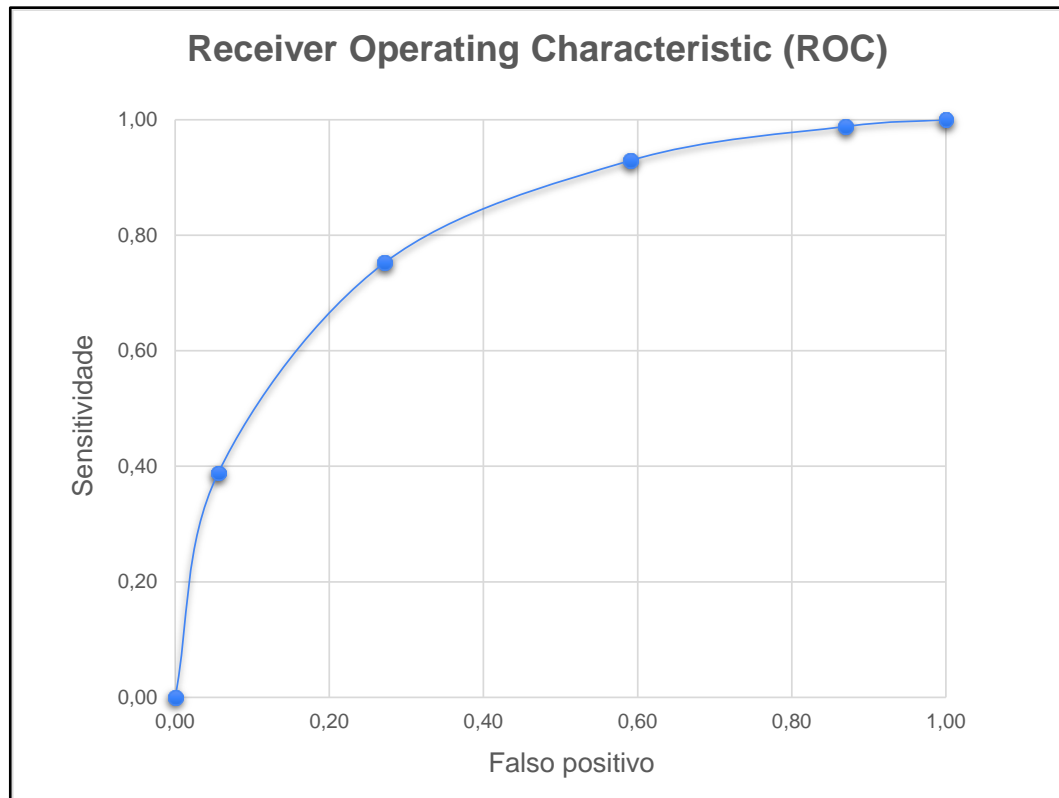


Figura 34 - Curva ROC para o mapa de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio Encano gerado pelo método peso de evidencia.

7 DISCUSSÕES

Durante o mapeamento das cicatrizes de movimento gravitacional de massa, principalmente na forma remota, observou-se que a maior parte dos movimentos de massa ocorrem em áreas de vegetação densa. Apesar disso, áreas com menos vegetação obtiveram maiores pesos (1,4 para vegetação ausente e 1,3 para vegetação rasteira e/ou esparsa), como observado em campo, onde vários movimentos de massa foram desencadeados em cortes de taludes de estradas rurais e próximos às residências instaladas em sopés de morros, além de diversos MGM's ocorrerem em terrenos de campo e pastagem, onde a vegetação é incipiente, especialmente em decorrência da evolução de rastejos.

O processo de desmatamento promove alterações na configuração do ambiente e sobre os fluxos hídricos de superfície e de subsuperfície, influenciando as condições de estabilidade das encostas (RODRIGUES, 2002). Os valores de peso $W+$ e contraste (C) mais elevados para regiões de vegetação rasteira/esparsa indicam que a retirada da vegetação induz a formação de áreas suscetíveis ou potencializa as situações naturais existentes. Quanto aos valores das áreas de vegetação ausente, representadas principalmente por áreas urbanizadas e vias de acesso rural confirmam o exposto em Tominaga *et al.* (2009), o qual relata que a expansão da urbanização é um agente instabilizador de encostas, principalmente pela execução mal planejada de cortes (taludes artificiais) e de sistemas de drenagem.

Em contrapartida ao que a literatura traz, as rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina apresentaram baixas correlações com a ocorrência de movimentos de massa. Segundo trabalhos de Tomazzoli, Flores e Bauzys (2009), Flores, Pellerin e Égas (2009), Bauzys (2012), Correia *et al.* (2013), Sbroglia e Higashi (2013), Coutinho (2016), Mallmann (2018) e Maccari (2022) as rochas gnáissicas do CGSC apresentam os maiores valores de suscetibilidade, enquanto neste trabalho os valores foram baixos. Para Tomazzoli *et al.* (2012) e Parizoto (2014), as rochas máficas e ultramáficas do CGSC foram as que obtiveram maior correlação, porém, como a unidade é pouco representativa na sub-bacia do Rio Encano, a ocorrência de MGM nela foi nula e, conseqüentemente foi observada uma correlação nula. O principal motivo pelo qual as rochas altamente intemperizadas e de grande espessura de solo do CGSC apresentarem poucas ocorrências de MGM se dá pelo fato de ocorrerem a norte da área, onde o relevo é majoritariamente plano, concedendo uma baixa tensão cisalhante em relação a tensão normal da encosta e, portanto, não propiciando o rompimento da mesma.

As rochas que apresentaram maior correlação com MGM foram as do Complexo Metamórfico Brusque, em especial as rochas metapelíticas e metapsamíticas, muito provavelmente por se encontrarem em regiões declivosas, de altitude elevada e de forte controle estrutural, ocorrendo próximas à Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó. Já as rochas do Complexo Ribeirão da Prata, que ocorrem em regiões mais declivosas e altas, e que possuem características litológicas e de grau de alteração semelhante às rochas do CGSC apresentaram a segunda maior correlação a ocorrência de MGM da área de estudo.

Flores, Pellerin e Égas (2009), Tomazzoli *et al.* (2012), Parizoto (2014) e Mallmann (2018) relatam que, dentre as rochas da Bacia do Itajaí, as litologias sedimentares de maior granulometria apresentam maiores correlações com a ocorrência de MGM, estando em concordância com os valores obtidos na sub-bacia do Rio Encano que, apesar de pouca correlação da Bacia do Itajaí como um todo, os arenitos e conglomerados foram os que obtiveram maiores valores de contraste.

A distância de principais estruturas geológicas demonstrou boa correlação com a ocorrência de MGM, apesar de a distância de 100 a 200 m apresentar valor de contraste superior à de 0 a 100 m, bem como a de 300 a 400 m superior a de 200 a 300 m. Observa-se na Figura 35 que a ocorrência de MGM segue uma tendência, demonstrando uma correlação geral inversa entre a distância de estruturas e a ocorrência de MGM, onde as classes mais próximas das estruturas possuem valores de contraste maiores, diminuindo com o aumento da distância.

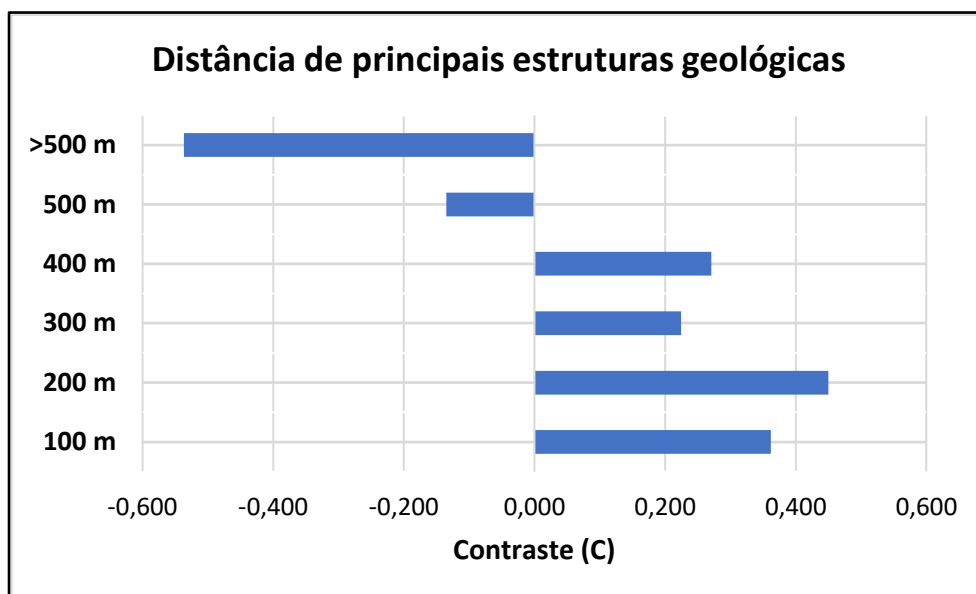


Figura 35 – Gráfico ilustrando a relação entre as classes de distância de principais estruturas geológicas e seus valores de contraste.

A declividade foi o fator condicionante que apresentou melhor correlação com a ocorrência de MGM dentre todos os fatores, exibindo os maiores valores de contraste. De acordo com a Figura 36, a suscetibilidade a MGM tende a aumentar conforme o aumento da declividade, consoante ao documentando na literatura (TOMAZZOLI, FLORES e BAUZYS, 2009; TOMAZZOLI *et al.*, 2012; SBROGLIA e HIGASHI, 2013; LIMA, 2013; SCHRAMM, 2019; MACCARI, 2022). As declividades acima de 60° demonstraram correlação nula, em função da ausência de MGM mapeados nestas áreas.

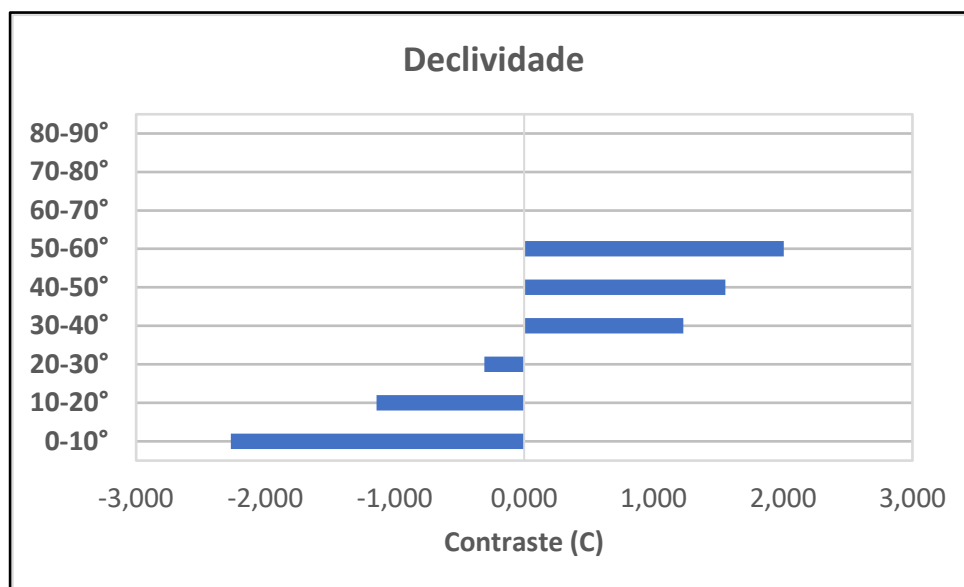


Figura 36 - Gráfico ilustrando a relação entre as classes de declividade e seus valores de contraste.

Quanto a orientação das encostas, segundo Baum e Godt (2010) e Hawke e Mcconchie (2011), este fator condicionante possui relação direta com a exposição à insolação, influenciando nos valores das taxas de evapotranspiração e do teor de água do solo. Portanto, se presume que, em regiões subtropicais, as encostas situadas nas faces de menor insolação, apresentem maiores teores de umidade no solo, influenciando na quantidade de água que poderá infiltrar e ser estocada no solo até atingir a condição limite de estabilidade.

A afirmação acima não corrobora com os resultados obtidos neste trabalho, dado que as faces que apresentaram maiores correlações com a ocorrência de MGM foram as voltadas para N e NE, as quais encontram-se em maior exposição à insolação, enquanto as faces voltadas para SW, S e SE apresentaram correlações negativas. Esta correlação entre MGM e as vertentes orientadas para N e NE fora observada em trabalhos realizados na região, como Tomazzoli *et al.* (2012), Parizoto (2014), Coutinho (2016) e Maccari (2022), que atribuíram o fenômeno à direção de entrada do sistema atmosférico responsável pelo desastre de 2008 na região, que se deu de NE para SW.

De acordo com Silveira, Alves e Murara (2012), a direção predominante dos ventos no Vale do Itajaí durante os meses de agosto a janeiro, com enfoque em novembro, é predominantemente NE. Conforme Severo (2009), nos momentos de maior precipitação durante o evento de 2008, ao qual se vincula a deflagração de boa parte dos MGM mapeados neste trabalho, a umidade associada com as chuvas teria origem no oceano Atlântico. Portanto, a direção preferencial dos ventos de direção NE aliada à umidade advinda do oceano

atlântico acarreta em um maior transporte de umidade e, conseqüentemente um maior aumento da saturação do solo para as faces voltadas a NE.

As altitudes mais elevadas da área de estudo, em geral apresentaram maior influência na suscetibilidade a MGM, principalmente em altitudes entre 800 e 1000 m, localizadas a montante da sub-bacia do Rio Encano. Provavelmente essa correlação ocorra por conta da concentração de declividades acentuadas e por estas classes ocorrerem próximas à ZCIP e no contato entre rochas da Bacia do Itajaí e do Complexo Metamórfico Brusque. A classe de altitude 500 a 600 m também apresentou correlação positiva, localizada do centro ao sul da sub-bacia do Rio Encano. As demais altitudes apresentaram correlação quase nula ou negativa.

A metodologia peso de evidência aplicada na análise de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa deste trabalho se mostrou eficiente, apresentando uma análise mais objetiva baseada em dados, e contornando a subjetividade da interferência de um especialista. Apesar da validação apresentar quase 80% de acurácia na previsão de ocorrências de MGM, outros fatores podem ser acrescidos ou melhor trabalhados para que este valor aumente, a exemplo de um mapa geológico de detalhe.

Considerando os pontos de validação do inventário de MGM, dentre os 85 MGM's, 33 se encontram em áreas classificadas como muito alta suscetibilidade e 31 em áreas de alta suscetibilidade, o equivalente a 75% dos pontos, conforme exibido na Figura 37.

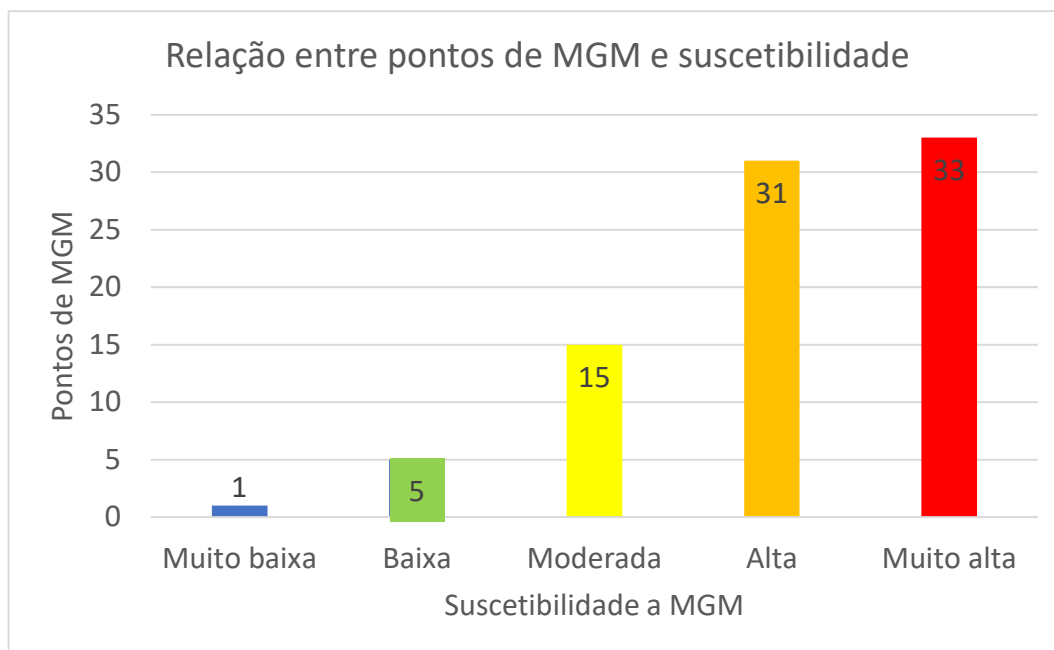


Figura 37 – Gráfico mostrando o número de ocorrências de cicatrizes de MGM dos pontos de validação nas distintas classes de suscetibilidade a MGM.

Através mapa de suscetibilidade a movimento gravitacional de massa percebe-se que as áreas mais críticas da sub-bacia do Rio Encano se encontram na porção sul, afastadas da ocupação urbana. No entanto, algumas áreas de alta a muita alta suscetibilidade ocorrem de forma isolada em regiões onde a ocupação urbana se faz presente (Figura 38).

A área 1 ocorre sobre gnaisses do CGSC e arenitos, conglomerados e siltitos da Bacia do Itajaí. Corresponde a uma região de campos, muito provavelmente destinados a pecuária, onde há cerca de 6 residências, algumas delas localizadas na beirada de morros de alta declividade, onde rastejos se fazem presentes e sua evolução poderá desencadear um deslizamento, podendo trazer danos aos que residem próximo. A área 2 também é uma região de pouca infraestrutura, localizada sobre os gnaisses do CGSC, e com poucas dezenas de moradias, muitas delas localizadas no sopé de cortes de taludes potencialmente instáveis.

A área 3 corresponde a uma área destinada à treinamentos militares do 23º Batalhão de Infantaria, localizada em altitudes moderadas, de relevo declivoso, sobre arenitos e conglomerados da Bacia do Itajaí. A área possui estradas muitas vezes próximas a ribanceiras, em locais onde o mapa indica alta suscetibilidade a MGM. Alguns eventos catastróficos já ocorreram nesta região, a exemplo do acidente ocorrido em março de 2022, onde um caminhão do exército caiu encosta abaixo, deixando 44 vítimas (g1 SC e NSC).

A área 4 é a mais suscetível de toda a sub-bacia do Rio Encano, ocupando cerca de 14 km² de área de alta e muito alta suscetibilidade, onde se observa a recorrência de diversos deslizamentos, mapeados tanto em ortofotos de 2010 quanto em imagens CBERS-4A de 2020. A região se encontra isolada de qualquer ocupação urbana e representa uma suscetibilidade elevada por uma série de fatores. Quanto às feições geomorfológicas, está inserida em elevadas altitudes, de grande declividade e com a maioria das faces das encostas voltadas a NE, além disso, a região se encontra no contato entre a Bacia do Itajaí e o Complexo Metamórfico Brusque, circundada por diversas falhas e fraturas associadas a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó.

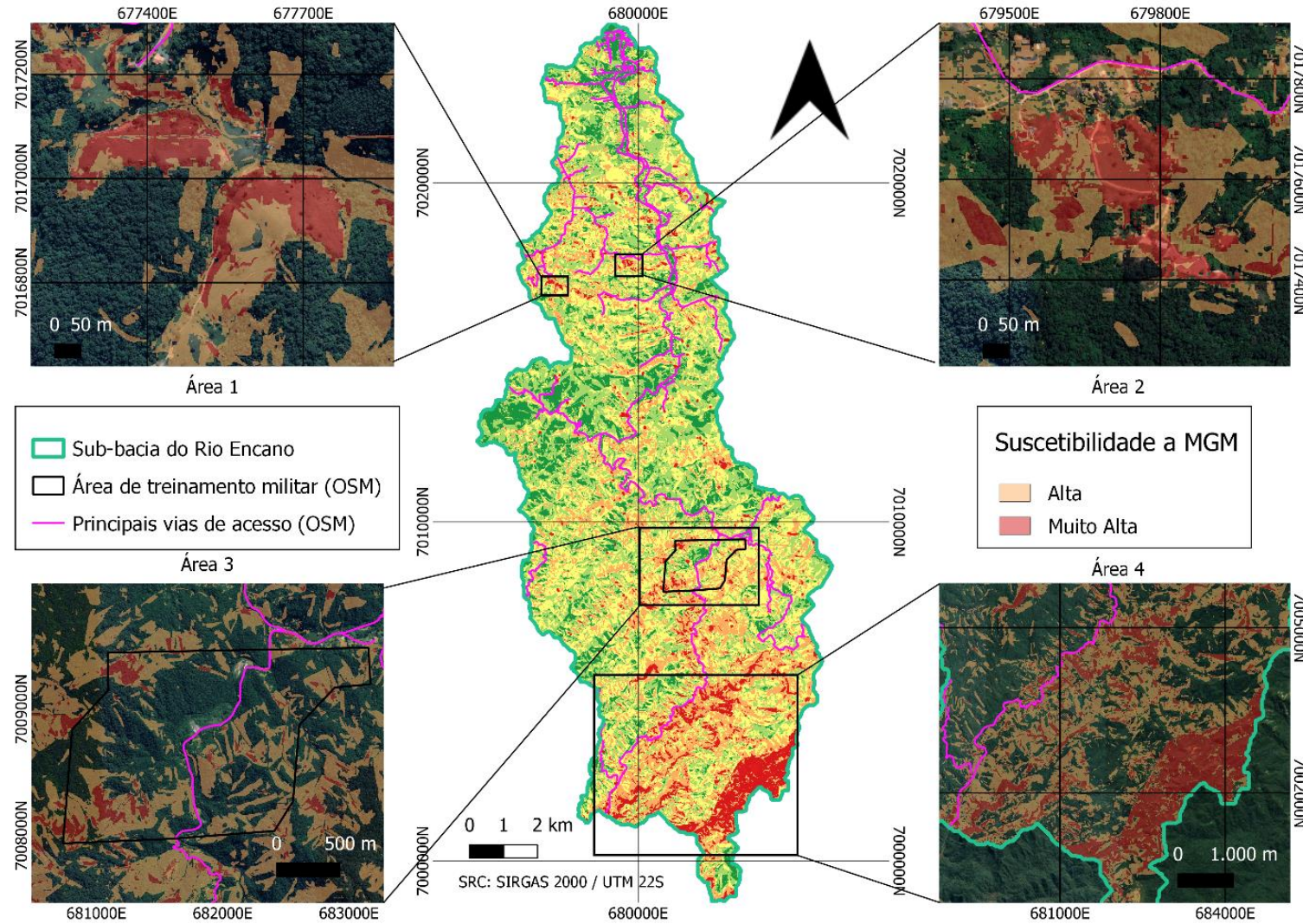


Figura 38 – Localização de áreas mais suscetíveis a ocorrência de MGM na sub-bacia do Rio Encano.

8 CONCLUSÕES

A atualização do inventário de movimento gravitacional de massa da sub-bacia do Rio Encano resultou no mapeamento de 283 cicatrizes, sendo 209 identificadas por fotointerpretação de ortofotos e MDS e MDT sombreados, 65 de imagens de satélite e 09 mapeadas em campo.

A análise de suscetibilidade realizada, mostra que as áreas mais propensas à ocorrência de movimentos de massa na área de estudo são aquelas localizadas sobre as rochas metapelíticas e metapsamíticas do Complexo Metamórfico Brusque, em altitudes elevadas e declividades de 50-60°, encostas voltadas a norte e nordeste, próximo de estruturas geológicas e em áreas com vegetação rasteira e/ou esparsa. A análise ainda permitiu evidenciar que os fatores condicionantes declividade e cobertura vegetal exercem as maiores correlações com o acontecimento de MGM.

O mapa de suscetibilidade a MGM gerado neste trabalho proporciona uma visualização geral das áreas mais suscetíveis à ocorrência de tais processos, servindo de auxílio para a seleção de áreas mais críticas que necessitem de estudos de maior detalhe, bem como para a confecção de mapas de risco a desastres naturais. Além disso, o mapa pode ser utilizado como uma ferramenta no planejamento urbano e no monitoramento por parte dos órgãos governamentais.

De acordo com os resultados, a área mais crítica da sub-bacia do Rio Encano se encontra afastada de ocupação humana, porém, deve-se dar atenção às áreas de alta a muito alta suscetibilidade que ocorrem de forma pontual e mais distribuída ao longo da área de estudo, as quais coincidem com áreas antropizadas. Recomenda-se a realização de trabalhos de maior escala, com enfoque tanto nas áreas de maior suscetibilidade que sejam ocupadas, quanto em áreas desocupadas, a fim de confirmar os resultados obtidos neste trabalho e, por sua vez servir com mais exatidão no planejamento territorial.

Os resultados obtidos neste trabalho foram satisfatórios e o mapa de suscetibilidade apresentou uma acurácia de 79%, permitindo com que os objetivos propostos fossem atingidos. Por fim, os dados *shapefile* e *raster*, bem como os produtos cartográficos gerados no presente trabalho ficam à disposição da comunidade, podendo serem obtidos por meio do contato com o autor.

REFERÊNCIAS

- AGTERBERG, F. P.; BONHAM-CARTER, G. F.; WRIGHT, D. F. **Statistical Pattern Integration for Mineral Exploration**: In: GAAL, G. e MERRIAM, D.F. (eds.). Computer Applications in Resource Estimation: prediction and assessment for metals and petroleum. Toronto: Pergamon Press, 1990;
- AGTERBERG, F. P. e CHENG, Q. 2002. **Conditional independence test for Weights of Evidence modelling**. Natural Resources Research, v. 11(4):249 – 255.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. **Províncias Estruturais Brasileiras**. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande, 1977, Anais, 363-391.
- 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.
- ARAÚJO, P. C. DE, 2004. **Análise da suscetibilidade a escorregamentos: uma abordagem probabilística**. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo. 2004. 172pp.
- APPI, C.J.; SOUZA CRUZ, C.E. **Estratigrafia de seqüências na Bacia do Itajaí**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36. Anais. Natal: v.1, p.93-106. 1990.
- 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, 1992. v. 2, p. 721 - 733.
- BARBIERI, G.; CAMBULI, P. **The weight of evidence statistical method in landslidesusceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy)**. In: 18 Th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, 2009, p. 13-17;
- BASEI, M. A. S.; DRUKAS, C. O.; SANTOS, P. R.; OSAKO, L.; ARCARO, N. P. **Estratigrafia, idade e proveniência dos sedimentos da bacia do Itajaí, SC, Brasil**. Anais.. Curitiba: SBG, 2008.
- 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. [s.l.], p. 543-569. abr. 2011.
- BASEI, M.A.S. **O Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina**. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1985, 190 p;

BASEI, M. A. S.; CAMPOS NETO, M. C.; CASTRO, N. A.; NUTMAN, A. P.; WEMMER, K.; YAMAMOTO, M. T.; HUECK, M.; OSAKO, L. S.; SIGA JR, O.; PASSARELLI, C. R. **Tectonic evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano belt, Santa Catarina, Southern Brazil.** Journal Of South American Earth Sciences, v. 32, n. 4, 2011, p. 324-350. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.016>.

BAUM, R. L.; GODT, J. W. **Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in USA.** 2010, p. 259-272.

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.

BINI *et al.* **Segmentação de cicatrizes de movimentos de massa baseado em análise orientada a objeto geográfico para o médio vale do Rio Itajaí-Açu/sc.** In: XI SINAGEO GEOMORFOLOGIA: COMPARTIMENTAÇÃO DE PAISAGEM, PROCESSO E DINÂMICA., 6 SIAGEO, 2016, Florianópolis. Anais [...] . Maringá: 2016.

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, Bacia do Itajaí (SC).** Rev. Brasil. Geoc., v.22, p.275-288, 1992.

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

BORBA, C. e LOPES, O. F. **O Grupo Brusque e seu embasamento na região de Itapema, SC.** In: SIMP. SUL-BRAS. GEOL., 2. Florianópolis, 1985. Anais... Florianópolis, SBG. 1983, p. 24-31

BONHAM-CARTER, G.F. **Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS.** Ottawa: Pergamon. 1994, p. 398.

BOLENEUS, D. E. *et al.* **Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State using weights-of-evidence GIS modeling.** Spokane: Usgs, 2001. 52 p.

CALDASSO, A.L.S., CAMOZZATO, E., RAMGRAB, G.E., SILVA, M.A.S., 1988. **Os granitóides Valsungana, Guabiruba e Faxinal no contexto dos metamorfitos do**

Complexo Brusque, Santa Catarina. In: Congr. Bras. Geol., 35, Belém. Anais. Belém, SBG 3, 1988, p. 1104-1116.

CALDASSO, A. L., KREBS, A. S. J., SILVA, M. A. S.; CAMOZZATO, E., RAMGRAB, G. E. 1995. **Mapa geológico 1:50.000 da folha Brusque, SC, SG-22-Z-D-II-1).** Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Brasília:CPRM. 243p.

CASTRO, N. A. de; CRÓSTA, A. P.; FERREIRA, F. J. F.; BASEI, M. A. S.; PASCHOLATI, M. E. **Quadro geológico regional da porção central do embasamento pré-ordoviciano de Santa Catarina com base em imagens Landsat-5/TM e aerogeofísicas.** Revista Brasileira de Geociências, 33(2): 161-172. 2003.

CIDADE-BRASIL. **Cidades e Municípios Brasileiros.** Disponível em: <<https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-indaial.html>> . Acesso em: 23 ago. 2021

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.

CORREIA, M. R. Dourado; NOGUEIRA, R. E.; SOUZA FILHO, C. R. de; POZZOBON, M. **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 - SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais [...] . Foz do Iguaçu: Inpe, 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.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. 425 p.

DAHAL, R. K. *et al.* **GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping.** Environmental Geology, [S.L.], v. 54, n. 2, p. 311-324, 12 jun. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-007-0818-3>.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p.

FERNANDES, N. F. e AMARAL, C. P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológica e geomorfológica.** In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro. 1996, p. 123-194.

FERNANDES, N. F. *et al.* **Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas**

susceptíveis. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 51-71, 19 dez. 2001. Revista Brasileira de Geomorfologia. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v2i1.8>.

FLORES, J.A.A. ; PELLERIN, J. R. G. M. ; ÉGAS, H. 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: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, Visoça. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009.

FLORISBAL, Luana Moreira. **Petrogênese de granitos sintectônicos em ambiente pós-colisional do escudo catarinense:** estudo integrado de geologia estrutural, geoquímica elemental e isotópica srnd- pb e geocronologia u-pb em zircão. 2011. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Cap. 8.

FORNARI, A. **Geologia e Metalogênese da porção meridional do Cráton Luis Alves-SC.** 1998. 136p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de Campinas, Campinas, 1998.

FRAGOSO CÉSAR, A.R.S. Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Geologia: **O Cráton do Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio - Sul - Riograndense.** Balneário Camboriú: Sbg, 1980. 14 p.

GARDA, G. M.; BRENTAN, F.; BASEI, M. A. S. **Tourmalinites of the Brusque Group in the São João Batista-Tijucas area, State of Santa Catarina, Brazil.** Geologia Usp. Série Científica, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 73-94, 1 mar. 2013. Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.5327/z1519-874x2013000100005>.

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

GERENTE, J.; BINI, G. M. P.; LUIZ, E. L. **Análise da variável forma de relevo como condicionante de movimentos de massa:** estudo de caso na bacia do rio saltinho em gaspar/sc. Revista Equador: (UFPI), Teresina, v. 4, n. 3. 2015.

GIRÃO, Ítalo R. F.; RABELO, D. R.; ZANELLA, M. E. **Análise teórica dos conceitos: Riscos Socioambientais, Vulnerabilidade e Suscetibilidade.** Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 4, p. 71–83, 2018. DOI: 10.21680/2447-3359.2018v4n0ID13273. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/13273>. Acesso em: 10 set. 2022.

GUADAGNIN, F., CHEMALE, Jr F., DUSSIN, I.A. **Depositional age and provenance of the Itajaí Basin, Santa Catarina State, Brazil:** Implications for SW Gondwana correlation. Precambrian Research, p.156–182. 2010.

GUERRA, A. J. T. **Processos erosivos nas encostas.** In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. (org.) Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p. 149-209;

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1984;

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.; ALTHOFF, F. J.; RONCHI, L. H.; DUBOIS, M. **Estudo de inclusões fluidas do Granito Parapente, Gaspar (SC): implicações para a evolução tectônica da zona de cisalhamento itajaí-perimbó**. Pesquisas em Geociências, [S.L.], v. 44, n. 3, p. 401, 28 maio 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <http://dx.doi.org/10.22456/1807-9806.83264>.

HARTMANN, L.A.; LEITE, J.A.D.; SILVA, L.C.da, REMUS, M.V.D.; MCNAUGHTON, N.J.; GROVES, D.I.; FLETCHER, I.R.; SANTOS, J.O.S.; VASCONCELLOS, M.A.Z. **Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understading the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil**. Australian Journal of Earth Sciences, v.47,p. 829-844. 2000.

HARTMANN, D. A.; SILVA, L. C.; ORLANDI, V. **O Complexo Granulítico de Santa Catarina**. Acta Geológica Leopoldensia, 1979, p. 94–112;

HAWKE, R.; McCONCHIE, J. **In situ measurement of soil moisture and pore water pressures in an “incipient” landslide: Lake Tutira, New Zeland**. Journal of Environmental Management. 92: 2011, p. 266-274.

HEILBRON, M. *et al.* **Província Mantiqueira. Tectonic Evolution Of Brasiliano/Pan-African Orogens**, [s. l], v. 1, cap. 18, p. 203-234, jun. 2004.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**. Virginia, 2008. United States Geological Survey Circular 1325, 129 p.

HONG, Yang; ADLER, Robert F.; HUFFMAN, George. **An Experimental Global Prediction System for Rainfall-Triggered Landslides Using Satellite Remote Sensing and Geospatial Datasets**. Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing, [S.L.], v. 45, n. 6, p. 1671-1680, jun. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2006.888436>.

IGLESIAS, C. M. F.; ZERFASS, H.; SILVA, M. A. S.; KLEIN, C. **Carta Geológica. Folha SG. 22-Z-B-JOINVILLE**, escala 1:250.000, CPRM, 2011.

INDAIAL. ASSOCIAÇÃO DE MUNICÍPIOS DO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ - AMMVI. **Estudo Técnico Socioambiental: Município de Indaial**. Indaial: 2019. 162 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Geomorfologia**. Folha Joinville – SG.22-Z-B. Escala: 1:250.000, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico de Uso da Terra**. Manuais Técnicos em Geociências número 7 - 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2013.

INTARAWICHIAN, N.; DASANANDA, S. **Analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chem watershed, Northern Thailand**. Suranaree Journal Science Technologies, v.17, n.3, p.277-292, 2010.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese. 2ª ed. 2009

KAUL, P. F. T. **Projeto Brusque-Serra do Tabuleiro**. [S.1]: DNPM/CPRM, 1979. 165 p.

KAUFMAN, Y.J. e TANRÉ, D. 1992. **Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS**. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, GE-30(2), p.261-270.

KOBIYAMA, M, MENDOÇA, M; MORENO, D. A; MARCELINO, I. P.V. O; MARCELINO, E. V; GONÇALVES, E. F; BRAZEETI, L. P; GOERL, R. F; MOLLERI, G. S. F; RUDORFF, F.M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

KREBS, A.S.J., LOPES, R. C., CAMOZZATO, E. **Caracterização faciológica da Bacia do Itajaí na folha Botuverá (SC)**. Em: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal, 1990. Anais. Sociedade Brasileira de Geologia, v. 1, p.82-92. 1990.

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.

LUIZ *et al.* **Influência de Lineamentos Estruturais na Ocorrência de Movimentos de Massa na Bacia do Rio Luís Alves, Vale do Itajaí-Santa Catarina**. In: XI SINAGEO GEOMORFOLOGIA: COMPARTIMENTAÇÃO DE PAISAGEM, PROCESSO E DINÂMICA,. 6 SIAGEO, 2016, Florianópolis. Anais [...] Maringá: 2016.

MAACK, R. **Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina**. Arq. Biologia e Tecnologia (IBPT), v. II, p. 63-154. 1947.

MACCARI, G. **Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no Município de Acurra – SC**. 2022. 119 p. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MALLMANN, P. **Mapeamento da Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa no Bairro Nova Esperança (Blumenau/SC)**. 2018. 76 f. TCC (Graduação) - Curso

de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MARCUZZO, Francisco F. N. et al. **Caracterização hidromorfológica da bacia do vale do itajaí**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Goiânia. Maceió: ABRHidro, 2011. p. 1-20.

MOREIRA, C. V. R.; NETO, A. G. P. **Clima e relevo**. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. e BRITO, S. N. A. de. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE. p. 69-85.

NOVO, E. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. Edgar Blucher, São Paulo, 1989.

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

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002.

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.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JR., F. (2016). **Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb g**. *Brazilian Journal Of Geology*. Brasília, p. 83-104.

PHILLIPP, R. P.; MALLMANN, G.; BITENCOURT, M. de F.; SOUZA, E. R. de; SOUZA, M. M. A. de; LIZ, J. D. de; WILD, F.; ARENDT, S.; OLIVEIRA, A. S.; DUARTE, L.; RIVERA, C. B.; PRADO, M. 2004. **Caracterização litológica e evolução metamórfica da porção leste do complexo metamórfico Brusque, Santa Catarina**. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1):21-34.

POPESCU, M. A. **Suggested method for reporting landslide causes**. In: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 50, 1994, pp.71-74;

POZZOBON, Maurício. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos no município de Blumenau, SC: uma abordagem probabilística através da aplicação da técnica pesos de evidência**. 2013. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Florestal, Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

RAINES, G.L. 2001. **Advanced Geographic Statistical Methods (Spatial Modeling)**. Resource materials for a GIS spatial analysis course Revision of Lectures. USGS.

RODRIGUES, B. B. 2002. **Proposta de sistemática para tomada de decisão relativa a movimentos de massa gravitacionais**: aplicação em Ouro Preto (MG). Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.

ROSTIROLLA, S.P.; AHRENDT, A.; SOARES, P.C.; CARMIGNANI, L. **Basin analysis and mineral endowment of the Proterozoic Itajaí Basin, southeast Brasil**. Basin Research, v.11, p. 127-142, 1999.

ROSTIROLLA, S. P.; ALKMIM, F. F.; SOARES, F. C. **O Bacia do Itajaí, SC, Brasil: exemplo de sedimentação de uma bacia flexural de antepaís**. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, v. 6, n.3/4, p. 123-147, 1992.

ROSTIROLLA, S.P.; MANCINI, F.; RIGOTI, A. e KRAFT, R.P. **Structural styles of the Permian reactivation of the Perimbo Fault Zone, Paraná Basin, Brazil**. Jour. S. A. Earth Sci., v. 16 (4), p. 287-300, 2003.

SALAMUNI, R.; BIGARELLA, J. J.; TAKEDA, F. K. **Considerações sobre estratigrafia e tectônica da Série Itajaí**. Boletim Paranaense de Geografia, s.1.1, v. 4/5, p. 188-201. 1961.

SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173 p

SANTA CATARINA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina Perh/Sc**. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável – Sds. Caracterização Geral das Regiões Hidrográficas de Santa Catarina: rh7 - vale do Itajaí: Certi, 2017. 40 p.

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.

SCHEIBE, L. F. **A Geologia de Santa Catarina: sinopse provisória**. In: GEOSUL. Florianópolis: Ufsc, 1986. Cap. 1. p. 1-35.

SCHULZ, Jr. A.; ALBUQUERQUE, L. F. F. **Geologia da Quadrícula de Rio do Sul, Santa Catarina**. Brasil. DNPM, Porto Alegre, 109 p. 1969.

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.

SEVERO, D. L. *et al.* **Análise hidrometeorológica do evento de 2008, no Vale do Itajaí – Santa Catarina.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. Anais [...] . Blumenau: Abrh, 2011. p. 1-1

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.

SILVA, M. P. ; GALATTO, S. L.; CAMASSOLA, T. M. **A variabilidade na precipitação pluviométrica média durante o El Niño 2015/2016 em Chapecó, Indaial e Urussanga, municípios do estado de Santa Catarina, Brasil.** Revista Tecnologia e Ambiente, Criciúma, v. 23, n. 1, p. 108-121, nov. 2017.

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, p. 60-73, 1991.

SOARES, A. P.; SOARES, P. C.; BETTÚ, D. F.; HOLZ, M. 2007. **Compartimentação estrutural da Bacia do Paraná: a questão dos lineamentos e sua influência na distribuição do aquífero Guarani.** Geociências. 26(4):297-311.

SOARES, P. C.; SOARES, A. P.; FIORI, A. P. 2002. **Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil.** Boletim Paranaense de Geociências. 51:59-76.

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, Lúcia K.; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosângela do. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo, 2015. Instituto Geológico, 3ª edição. 196 páginas.

VALERIANO, M. de M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de Textos. 2008. p.72-104.

VARNES, D.J. **Slope Movement Types and Processes.** In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, Special Report No. 176, National Academy of Sciences, 1978, p. 11-33.

WIECZOREK, G. F. **Preparing a Detailed Landslide-Inventory Map for Hazard Evaluation and Reduction.** *Environmental e Engineering Geoscience*, [S.L.], v. , n. 3, p. 337-342, 1 ago. 1984. GeoScienceWorld. <http://dx.doi.org/10.2113/gsegeosci.xxi.3.337>.

WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J.A.; BINOTTO, R.B.; IGLESIAS, C.M.F.; LAUX, J.H. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina.** Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

ZÊZERE, J. L. **Dinâmica de Vertentes e Riscos Geomorfológicos.** Centro de Estudos Geográficos, Relatório nº. 41, Lisboa, 2005;

ZHU, Lei; HUANG, Jing-Feng. **GIS-based logistic regression method for landslide susceptibility mapping in regional scale.** *Journal Of Zhejiang University-Science A*, [S.L.], v. 7, n. 12, p. 2007-2017, dez. 2006. Zhejiang University Press. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.2006.a2007>.

ZUCHERATO, B.; FREITAS, M. I. C. **A determinação de um método de classificação para a elaboração de um atlas escolar** “Atlas Ambiental do Estado de São Paulo”. In: COLÓQUIO DE CARTOGRAFIA PARA CRIANÇAS E ESCOLARES, 7, 2011. Vitória. Anais... Vitória, 2011. p. 66-83