

SUSCETIBILIDADE AO DESENVOLVIMENTO DE CORRIDAS DE DETRITOS NO TERRITÓRIO DO GEOPARQUE CAMINHOS DOS CÂNIONS DO SUL (RS/SC)

Marina Tamaki de Oliveira Sugiyama

Universidade do Estado de Santa Catarina
Av. Me. Benvenuta, 2007 CEP: 88.035-901
E-mail: maritamaki12@gmail.com

Maria Carolina Villaça Gomes

Universidade do Estado de Santa Catarina
Av. Me. Benvenuta, 2007 CEP: 88.035-901
E-mail: mcarolvlq@gmail.com

Resumo

Diversos estudos têm apontado a forte relação entre os parâmetros morfométricos e a deflagração de processos hidrogeomorfológicos, como as corridas de detritos. Tendo em vista a proposta de criação do Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul (RS/SC) em uma área historicamente atingida por estes processos, este trabalho tem como objetivo avaliar a partir da morfometria a suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos no território do Geoparque. Para tanto, foram delimitadas 25 bacias hidrográficas na área de estudo, para as quais foram gerados 12 parâmetros morfométricos. Por fim, foram confrontados o resultado da suscetibilidade, o registro de ocorrências e a localização dos geossítios. Dessa forma, os resultados apontam para uma elevada suscetibilidade a corridas de detritos em bacias com a presença de geossítios, comprovando a necessidade de estudos sobre a suscetibilidade a estes processos para a elaboração de um plano preventivo de redução de riscos e desastres.

Palavras-chave: Corridas de detritos; Morfometria; Suscetibilidade.

1. Introdução

As corridas de detritos são movimentos de massa induzidos pela ação da gravidade, nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos (COSTA, 1984). Este processo é caracterizado pela alta capacidade de erosão e alta velocidade que, comumente, varia de 5 a 20m/s, transportando um grande volume de material por longas distâncias em um curto período (KANJI e GRAMANI, 2001). O material transportado é constituído por uma massa conjugada de sólidos e fluidos, formados por grandes volumes de material fino, blocos de rocha, troncos, quantidades variadas de água e outros materiais presentes nas encostas.

Esta tipologia de movimento de massa é considerada um dos mais destrutivos processos naturais associados à dinâmica externa, sendo responsáveis por expressivas transformações na paisagem (KANJI e GRAMANI, 2001). O poder destrutivo das corridas tende a aumentar conforme a distância percorrida, da sua iniciação até sua deposição, devido à remobilização do material preexistente que é incorporado ao longo de seu trajeto. Este comportamento está ligado às características da rede de drenagem e do terreno, sobretudo a declividade, que contribui para o aumento da velocidade deste processo. No geral, as corridas de detritos no Brasil estão relacionadas a escorregamentos de encostas ocasionados por precipitações anômalas que

aumentam o teor de umidade das encostas e resultam na perda de atrito interno do material em repouso (CORREA, 2018). Chuvas de grande intensidade e de curta duração, geralmente a partir de 60-70mm/h, são responsáveis pela deflagração de movimentos de massa, com ocorrência generalizada de deslizamentos e corridas de detritos (KANJI e GRAMANI, 2001).

Além dos condicionantes hidrológicos, como altos índices pluviométricos, a ocorrência de corridas é favorecida por um conjunto de fatores geológicos (presença de detritos ou rochas passíveis de mobilização), geomorfológico (declividade, geralmente superior aos 25°, e curvatura das encostas) (IPT, 2002). Dessa forma, as corridas de detritos são processos fortemente influenciados pelas características morfométricas da bacia, relativas ao padrão de drenagem e à configuração do relevo. Diversos autores têm utilizado os parâmetros morfométricos para o estudo das corridas de detritos (JAKOB, 1996; DE SCALLY *et al.*, 2001; VIEIRA *et al.* 1996; DIAS *et al.*, 2016; GOMES, 2016; KANJI e GRAMANI, 2001; CABRAL *et al.*, 2021), demonstrando a importância da morfometria para a deflagração deste processo.

A análise das características morfométricas do padrão de drenagem e do relevo, além de expressar a forte relação com a litologia, estrutura geológica e formação superficial dos elementos que compõem a superfície terrestre, possibilita a obtenção de informações referentes as propriedades do terreno, como a infiltração, fluxo dos canais e escoamento superficial (PISSARA, 2004). O fluxo dos canais depende dos fatores que determinam o excesso de água precipitada e aqueles que influenciam o tempo total que a chuva leva para percorrer toda a bacia (MORISAWA, 1962). Os fatores que controlam o excesso de chuva estão intimamente relacionados ao clima, vegetação, capacidade de infiltração e estoque superficial de água. Já os fatores geomorfológicos, tais como comprimento dos canais, forma da bacia, declividade, bem como a litologia e a estrutura geológica, influenciam no escoamento superficial e na vazão fluvial.

Além disso, a literatura mostra que a maioria das corridas de detritos ocorre em bacias de alta declividade e pequena dimensão (KELLER, 1992; KANJI e GRAMANI, 2001; CASTRO, 2003). A declividade de uma bacia é um dos principais fatores que regulam o tempo de concentração nos cursos d'água e o tempo de duração do escoamento superficial. Além disso, bacias com maior declividade possuem maior ação da gravidade sobre os processos geomorfológicos e, conseqüentemente, sobre o transporte e deflagração das corridas de detritos (JAKOB, 1996). Declividades de encostas superiores a 30° são consideradas crítica para a geração de corridas, ainda que seus valores mínimos variem de 20° a 25, enquanto que, nos canais, a declividade para movimentação do material depositado no leito varia de 15 a 20° (KANJI e GRAMANI, 2001).

Conforme exposto, os parâmetros morfométricos guardam estrita relação com os processos geomorfológicos, entretanto, os parâmetros por si só não são capazes de fornecer uma análise conclusiva sobre os processos. Sendo assim, são os significados das correlações dos parâmetros, índices morfométricos e as características hidrológicas que revelam a atuação dos processos hidrogeomorfológicos, como as corridas de detritos (CHEREM *et al.*, 2020).

Em áreas protegidas, as quais abrangem elementos dotados de interesses científicos, educativos, culturais, e turístico, seus efeitos, embora importantes para a dinâmica natural da paisagem, podem levar à descaracterização momentânea deste patrimônio natural, bem como colocar em risco os frequentadores destes espaços. No território do Geoparque Caminho dos Cânions do Sul (GCCS), localizado nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, os geossítios abrangidos são periodicamente palco de eventos hidrogeomorfológicos de grande magnitude, sendo estes locais, por vezes, dotados de valor científico devido à própria ocorrência desses eventos.

Dentre os eventos de grande magnitude ocorridos na região, cabe destaque aos ocorridos em dezembro de 1995, quando os elevados índices pluviométricos, associados à passagem de um sistema frontal e um vórtice ciclônico, ocasionaram processos erosivos generalizados nas escarpas e patamares da Serra Geral (VALDATI, 2000). Entretanto, conforme Pellerin *et al.* (1997), apesar de catastrófico, este evento não pode ser considerado totalmente excepcional, uma vez que em 1974 um evento semelhante, ainda de maior magnitude, foi registrado nas encostas da Serra Geral. Além disso, os depósitos encontrados em fundos de vale demonstram que o fenômeno é recorrente na história geológica da região (DUARTE, 1995).

Dessa forma, tendo em vista a existência de geossítios em uma área historicamente atingida por processos de movimentos de massa, com registros de corridas de detritos, este trabalho tem como objetivo avaliar a partir da morfometria de bacias a suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos no território do Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul (RS/SC). A identificação de áreas com diferentes graus de suscetibilidade é fundamental para a elaboração de um plano preventivo de redução de riscos e desastres.

2. Área de estudo

Com uma área de 2.829 km² o GCCS engloba sete municípios pertencentes aos estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo eles: Cambará do Sul (RS), Jacinto Machado (SC), Mampituba (RS), Morro Grande (SC), Praia Grande (SC), Timbé do Sul (SC) e Torres (RS) (Figura 1).

A conformação geológica da área de estudo é resultado da conjunção de inúmeros eventos geotectônicos que remontam à evolução da Bacia do Paraná, que se caracteriza como uma bacia vulcanossedimentar intracratônica que evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana. O arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná é formado por seis Supersequências, sendo que no território do GCCS encontram-se os registros das Supersequências Gondwana I, com os arenitos eólicos, pelitos lacustres e depósitos fluviais da Formação Rio do Rasto, e Gondwana III, com os sedimentos eólicos da Formação Botucatu e os derrames vulcânicos da Formação Serra Geral.

O soerguimento da borda leste do Planalto, concomitante ao processo de separação do Gondwana, expôs todo o pacote de rochas sedimentares da Bacia do Paraná a intensos fenômenos erosivos, formando desníveis de mais de 1.000m. Assim, na área de estudo encontram-se quatro compartimentos geomorfológicos bem delimitados: o Planalto, a Serra, os Patamares e a Planície (Figura 1).

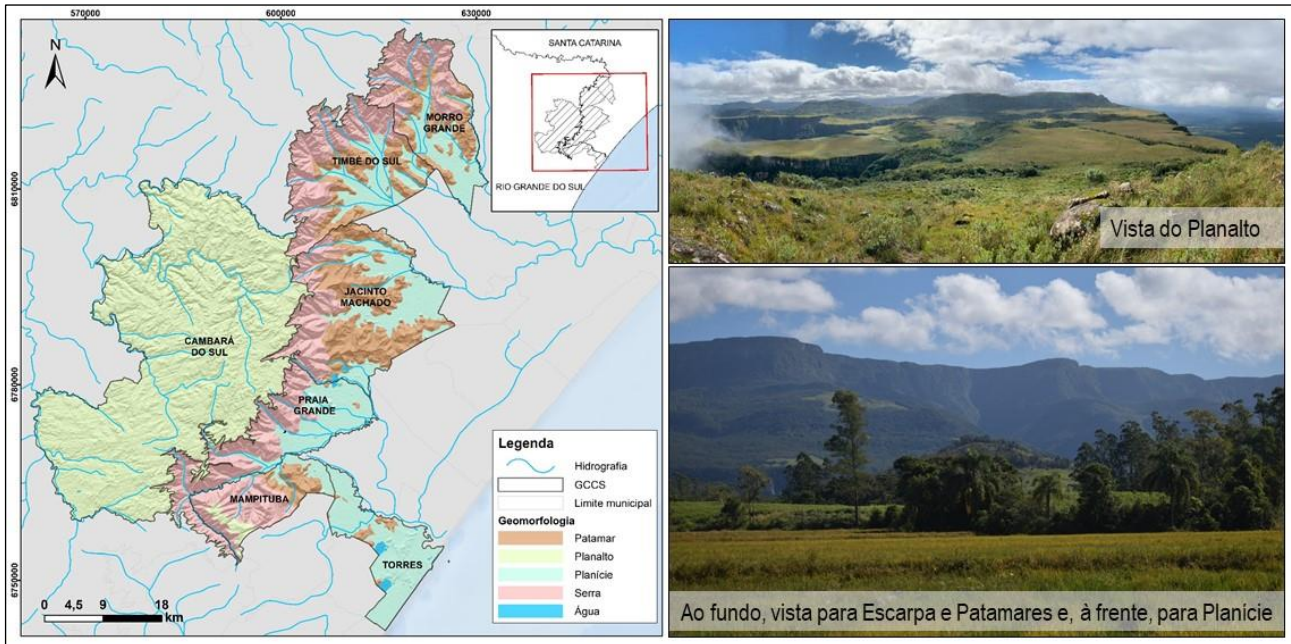


Figura 1 - Localização da área de estudo e compartimentação geomorfológica.

O Planalto dos Campos Gerais constitui o Planalto Sul Brasileiro soerguido durante o Cretáceo e que possui uma suave e contínua inclinação da superfície para o oeste, em direção ao interior. Neste compartimento encontram-se as nascentes dos principais rios da região, seguindo um nítido controle estrutural de falhas e diáclases. O relevo é marcado por formas planas e suavemente onduladas, de baixa declividade, em altitudes superiores aos 900m. Já a Serra Geral representa na realidade as escarpas do planalto e é caracterizada pela intensa dissecação do seu *front*, muitas vezes condicionada pelas estruturas geológicas do substrato, apresentando profundos vales em “V”, com formas abruptas e escarpadas, localizada em altitudes entre 400 e 900m (FLORES *et al.*, 1993). As escarpas da Serra Geral apresentam, ao longo da área de estudo, paredes verticalizados na forma de cânions, devido à incisão fluvial ao longo dos lineamentos tectônicos, sendo comum a ocorrência de quedas de blocos no contato entre os derrames de diferente acidez (SANTOS, 2021).

Em altitudes um pouco mais inferiores (de 200 a 400m) encontram-se os Patamares da Serra Geral, constituindo o relevo intermediário entre as formas escarpadas da Serra Geral e a Planície Costeira. Este compartimento é constituído por relevo moderadamente dissecado, com colinas

onduladas e média declividade. Por fim, a Planície Costeira, formada por sistemas deposicionais continentais e costeiros, se situa em cotas inferiores aos 200m.

O território do GCCS está inserido em duas grandes bacias hidrográficas: a Bacia do rio Mampituba e do rio Araranguá. Grande parte das cabeceiras das bacias do rio Araranguá e Mampituba encontra-se nos terrenos íngremes da Formação Serra Geral, apresentando um nítido controle estrutural no padrão de drenagem. Já as cabeceiras situadas nos Patamares da Serra Geral encontram-se encaixadas em rochas sedimentares da Formação Rio do Rasto e Formação Botucatu, apresentando um padrão de drenagem dendrítico. Quando deixam os terrenos íngremes das encostas, os rios atingem os sedimentos quaternários da Planície Costeira, onde o relevo é muito suave e a drenagem é caracterizada por canais entrelaçados. Somente esparsos fragmentos do Planalto estão inseridos na bacia do rio Araranguá, possivelmente, devido ao recuo mais expressivo do *front* da Serra Geral nesta região - muitas das pequenas cabeceiras de drenagem que antes fluíam para oeste, foram capturadas pelos tributários do rio Araranguá, a partir do recuo erosivo da escarpa.

A nítida diferenciação entre os compartimentos do relevo na área de estudo guarda estreita relação com a ocorrência de processos de grande magnitude. Um fator de extrema contribuição para os altos índices pluviométricos da região é a barreira orográfica representada pela escarpa da Serra Geral. Valdati (2000) registrou uma média de precipitação anual de 2519mm nas encostas da Serra Geral, a 220m de altitude, e 1766mm a 70m de altitude, representando um aumento de 30% na precipitação em apenas 160m. A precipitação média anual da área de estudo varia de 1507mm no município de Torres, a 8,47m de altitude, e 1823mm em Cambará do Sul, a 1015m (INMET, 2020). Assim, as chuvas resultantes da colisão de sistemas frontais, somadas ao efeito orográfico na escarpa, condiciona a grande recorrência de movimentos de massa na área do GCCS, de forma que no período de 1974 a 2017 foram registradas cerca de 16 ocorrências de “deslizamentos”, entretanto, não foi possível diferenciar os tipos de movimentos de massa nos registros de ocorrências (PIMENTA *et al.*, 2018).

3. Metodologia

Os procedimentos adotados para este trabalho se dividem em quatro etapas principais: (i) delimitação das bacias hidrográficas; (ii) geração dos parâmetros morfométricos; (iii) avaliação da suscetibilidade das bacias ao desenvolvimento de corridas de detritos e; (iv) análise conjunta da suscetibilidade com os registros de ocorrência de corridas e a localização dos geossítios. Para o processamento e análise dos dados, utilizou-se o *software* ArcGis 10.5 disponibilizado pela empresa ESRI.

O processamento dos dados foi realizado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), elaborado com base nos dados SRTM com resolução de 30 m. Para o refinamento da drenagem gerada a partir do MDE, foi utilizada

a base hidrográfica do Estado de Santa Catarina da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS), elaborada em escala 1:10.000 e produzida a partir de dados com 1m de resolução.

O recorte espacial teve como critério as bacias hidrográficas do GCCS que atingem o compartimento da planície costeira, excluindo, portanto, as bacias hidrográficas localizadas exclusivamente na escarpa e no planalto. Além disso, foram analisadas somente bacias a partir da 3º ordem hierárquica. Após a delimitação das bacias hidrográficas foram gerados 12 parâmetros morfométricos com base no uso recorrente na literatura e que apresentaram resultados confiáveis, considerando tanto os parâmetros relativos à rede hidrográfica como do relevo da bacia (Figura 2).

Parâmetro-(Autor) ^α	Autor ^α	Unidades ^α
Ordem-hierárquica-(O) ^α	Strahler, 1945; Christofletti, 1980 ^α	Ordinal ^α
Área-da-Bacia-(A) ^α	Keller, 1992; Kanji, 2005; Castro, 2003; Zăvoianu, 1985; Morisawa, 1962; Jakob, 1996 ^α	Km ^{2α}
Área-acima-de-30°-(A ₃₀) ^α	Kanji-e-Gramani, 2001; Gramani- <i>et al.</i> , 2005 ^α	% ^α
Perímetro-(P) ^α	Souza, 2005; ZĂVOIANU, 1985 ^α	Km ^α
Densidade-de-drenagem-(Dd) ^α	Horton, 1945; Morisawa, 1962; Zăvoianu, 1985 ^α	Adimensional ^α
Taxa-de-relevo-(Tr) ^α	Horton, 1945; JAKOB, 1996; GOMES, 2016 ^α	M/km ^α
Comprimento-do-canal-principal-(L) ^α	HORTON, 1945; Zăvoianu, 1985; Souza, 2005. ^α	Km ^α
Declividade-média-da-bacia-(S) ^α	Kanji-e-Gramani, 2001; JAKOB, 1996; Horton, 1945 ^α	Graus-(°) ^α
Declividade-média-do-canal-principal-(S _L) ^α	Souza, 2005; Morisawa, 1962. ^α	Graus-(°) ^α
Amplitude-altimétrica-(H) ^α	Jakob, 1996; Gomes, 2016; Dias, 2017 ^α	M ^α
Índice-de-circularidade-(Ic) ^α	Kanji-e-Gramani, 2001; Gramani- <i>et al.</i> , 2005; Morisawa, 1962. ^α	Adimensional ^α
Comprimento-total-dos-canais-(L _C) ^α	Souza, 2005; Horton 1945; Morisawa, 1962 ^α	Km ^α

Figura 2 - Parâmetros morfométricos utilizados na pesquisa.

Uma vez obtido o resultado dos parâmetros morfométricos para as bacias de drenagem, procedeu-se à geração dos coeficientes de correlação de Pearson, com o intuito de avaliar as relações entre os parâmetros morfométricos (referentes à rede de drenagem e superfície da bacia hidrográfica) e a litologia/condicionantes estruturais.

Para a avaliação da suscetibilidade a corridas de detritos, utilizou-se a metodologia de Gramani *et al.* (2005), desenvolvida com o intuito de identificar o grau de criticidade das bacias à deflagração de corridas. A criticidade das bacias é obtida a partir da relativização dos valores dos parâmetros

para as bacias, de forma que seu resultado aponta para uma maior ou menor criticidade relativa. O método propõe uma análise qualitativa baseada nos resultados dos parâmetros considerados como condicionantes das corridas de detritos, sendo eles: porcentagem da área com *declividade superior a 30°* (A_{30}); inverso da *área da bacia* ($\frac{1}{A}$); *amplitude da bacia* (H); *declividade do canal principal* (S_L) e; inverso do *índice de circularidade* ($\frac{1}{I_C}$).

Conforme a metodologia, os valores dos parâmetros foram transformados em índices adimensionais, a partir da divisão de cada parâmetro da bacia pelo menor valor do mesmo parâmetro obtido para as demais bacias, de modo que o menor valor de cada parâmetro seja igual a 1,0. Após esta etapa, os valores foram ponderados a partir de pesos definidos conforme sua importância no processo de geração de corridas, sendo eles: 2,5 para A_{30} ; 0,5 para $\frac{1}{A}$; 1,0 para H; 0,5 para S_L e; 0,5 para $\frac{1}{I_C}$. Para cada bacia foram somados os valores ponderados de cada parâmetro, os quais foram normalizados novamente, resultando em um índice de criticidade para as bacias.

A partir do índice de criticidade obtido através da metodologia de KANJI e GRAMANI (2001), foram definidos intervalos homogêneos para a categorização das bacias em classes de suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detrito, sendo elas: BAIXA, MÉDIA, ALTA e MUITO ALTA.

Por fim, o resultado da classificação das bacias em relação à suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos foi confrontado com os registros de ocorrência de eventos extremos no território do GCCS, durante o período de 1974 a 2017 (PIMENTA *et al.*, 2018), e com a localização dos geossítios, com o intuito de averiguar a localização das bacias de maior suscetibilidade em relação aos mesmos.

4. Resultados e discussões

A etapa de delimitação das bacias para a avaliação da suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos resultou na definição de 25 bacias de drenagem no território do GCCS (Figura 3). Os resultados da aplicação dos parâmetros morfométricos demonstram que as bacias da área de estudo possuem configurações distintas, com expressivas diferenças em suas características morfométricas, ainda que inseridas em um mesmo contexto geológico-geomorfológico.

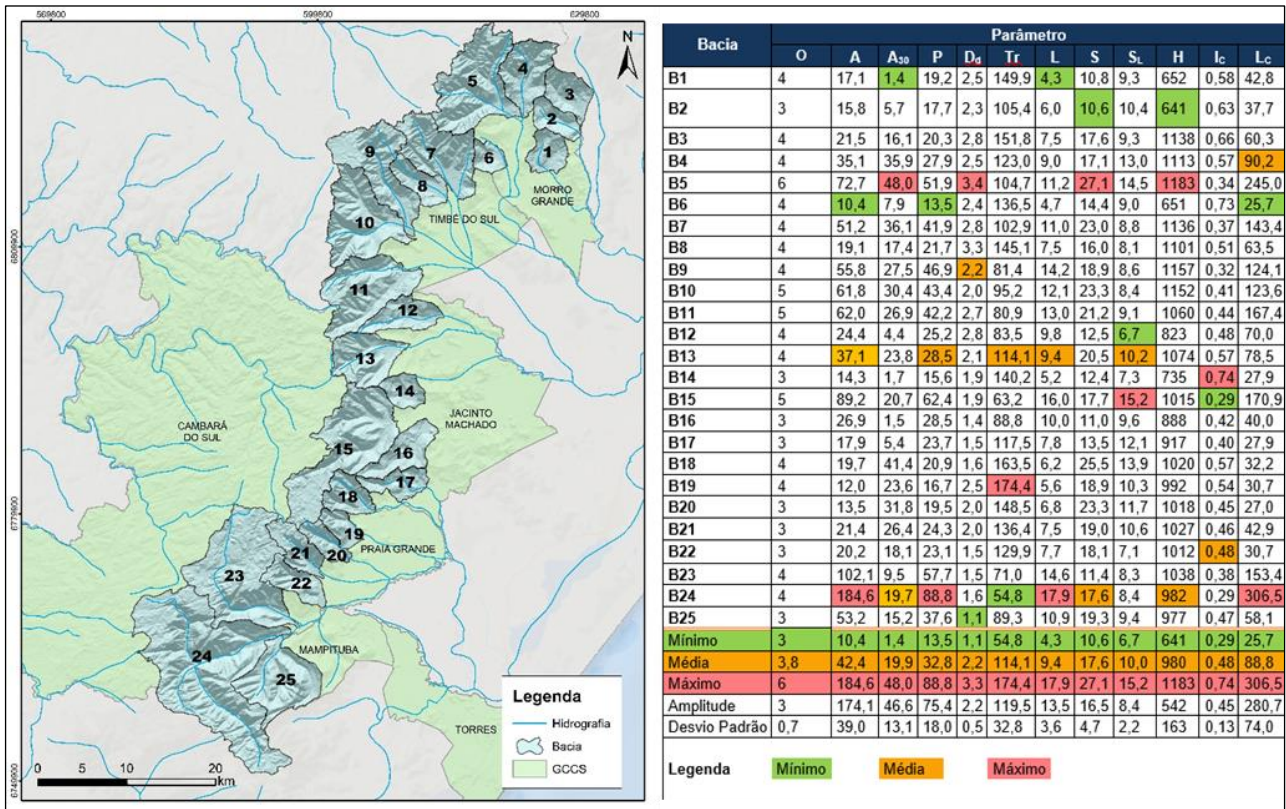


Figura 3 – À direita, resultado da delimitação das bacias de drenagem e, à esquerda, resultado dos parâmetros obtidos. Legenda: ordem hierárquica (O); área da bacia (A); porcentagem da área acima de 30° (A₃₀); perímetro (P); densidade de drenagem (Dd); taxa de relevo (Tr); comprimento do canal principal (L); declividade média da bacia (S); declividade média do canal principal (S_L); amplitude altimétrica (H); índice de circularidade (I_c); comprimento total dos canais (L_c).

A amplitude dos resultados dos parâmetros foi: área da bacia (A), entre 10,48 e 184,67km²; taxa de relevo (Tr), entre 54,82 e 174,41; perímetro da bacia (P), entre 13,45 e 88,89km.; área acima de 30° (A₃₀), entre 1,4 e 48,8%; comprimento total dos canais (L_c), entre 25,7 e 306,5km; densidade de drenagem (Dd) de 1,1 a 3,4; comprimento do canal principal (L) de 4,35 a 17,93km; declividade média da bacia (S) de 10,66° a 27,17°; declividade do canal principal (S_L) de 6,7 a 15,2°; amplitude altimétrica (H) de 641 a 1183m; índice circularidade (I_c) de 0,29 a 0,74 e; ordem hierárquica (O) de 3° a 6°. No território do GCCS a maior bacia é a B24, de 4° ordem, com uma área de 184,67km², 88,89km de perímetro, 17,93km do canal principal e declividade média de 17,62°. Já a menor bacia (B6, com 10,48km² de área) possui os menores valores de perímetro (13,45km) e de canal principal (4,71km), valores médios de declividade (14,45°) e ordem hierárquica igual a 4° ordem.

Dentre os 66 coeficientes de correlação gerados (Figura 4), foram obtidas apenas 14 correlações significativas: A/P (0,98); A/Tr (-0,75); A/L (0,89); A/L_c (0,91); A₃₀/S (0,93); A₃₀/H (0,75); P/Tr (-0,80); P/L (0,94); P/I_c (-0,78); P/L_c (0,93); Tr/L (-0,88); L/I_c (-0,81); L/L_c (0,84) e; S/H (0,71). Os parâmetros que apresentaram maior relação significativa com os demais foram a área (A) e o perímetro (P), que também apresentaram forte relação positiva entre si e com os parâmetros de comprimento do canal principal (L) e comprimento total dos canais (L_c), além de uma relação forte e inversamente proporcional com a taxa de relevo (Tr). Ainda, o perímetro (P) apresentou uma forte relação negativa

com o *índice de circularidade* (Ic), que por sua vez, também apresenta forte relação inversamente proporcional com o *comprimento do canal principal* (L).

	O	A	A30	P	Dd	Tr	L	S	SL	H	IC	Lc
O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A30	0,52	0,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	0,47	0,98	0,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dd	0,54	-0,20	0,26	-0,17	-	-	-	-	-	-	-	-
Tr	-0,3	-0,75	0,07	-0,80	0,23	-	-	-	-	-	-	-
L	0,44	0,89	0,24	0,94	-0,18	-0,88	-	-	-	-	-	-
S	0,47	0,16	0,93	0,22	0,15	0,10	0,20	-	-	-	-	-
SL	0,32	0,02	0,509	0,09	0,02	0,10	0,03	0,411	-	-	-	-
H	0,43	0,321	0,75	0,411	0,14	-0,15	0,5	0,71	0,22	-	-	-
IC	-0,3	0,321	-0,344	-0,78	0,16	0,67	-0,81	-0,31	-0,19	-0,54	-	-
LC	0,67	0,91	0,396	0,93	0,15	-0,7	0,84	0,328	0,13	0,44	-0,67	-

Legenda: Fraca Média Forte

Figura 4 – Resultado dos coeficientes de correlação de Pearson, gerados para os 12 parâmetros morfométricos utilizados. Legenda: ordem hierárquica (O); área da bacia (A); porcentagem da área acima de 30°(A₃₀); perímetro (P); densidade de drenagem (Dd); taxa de relevo (Tr); comprimento do canal principal (L); declividade média da bacia (S); declividade média do canal principal (S_L); amplitude altimétrica (H); índice de circularidade (Ic); comprimento total dos canais (Lc).

A *área acima de 30°* (A₃₀) apresentou forte relação positiva com o a *amplitude altimétrica* (H) e com a *declividade média da bacia* (S), entretanto, a relação com a *declividade do canal principal* (S_L) foi moderada, demonstrando a importância da utilização destes dois parâmetros (S e S_L) de maneira desassociada. Ainda, a *declividade do canal principal* (S_L), assim como a *densidade de drenagem* (Dd), não apresentaram nenhuma correlação significativa com os demais parâmetros. Os maiores coeficientes de correlação obtidos foram: A/P (0,98), L/P (0,94), A₃₀/S e Lc/P (0,93).

O resultado dos parâmetros morfométricos indicam características típicas de bacias localizadas em áreas escarpadas (com valores elevados de H, A₃₀ e S) e que possuem um nítido controle estrutural, refletido diretamente nos resultados da Dd e Ic. Os valores relativamente baixos/medianos da Dd em uma área com alto índice pluviométrico, solos rasos e pouco permeáveis, demonstram a forte incisão fluvial nas linhas de falhas e fraturas, uma vez que este parâmetro é fortemente condicionado pelas estruturas (MORISAWA, 1962). Da mesma forma, os valores baixos de Ic, inversamente proporcional a P, expõem o forte controle estrutural sobre a drenagem na área de estudo, pois, nas bacias onde o canal principal encontra-se encaixado nos lineamentos, a drenagem tende a seguir um traçado retilíneo em direção a jusante, resultando em um formato mais alongado para as bacias, ao contrário daquelas que apresentam pouco controle estrutural, e apresentam formatos mais circulares. Vale destacar que as bacias com maiores valores

de Ic possuem maior área nos Patamares da Serra Geral, onde predominam as litologias sedimentares da Formação Rio do Rasto e Botucatu que, por sua vez, apresentam menor concentração de lineamentos se comparados à Formação da Serra Geral.

Os valores obtidos para o índice de criticidade variam de 1,0 a 8,7, sendo a B18 a de maior suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas e a B16 a de menor suscetibilidade (Figura 5). Seguindo a ordem de criticidade, as bacias B16, B1, B14, B12, B17, B2, B23 e B6 foram classificadas como de **Baixa Suscetibilidade**, com índice de criticidade variando de 1,0 a 2,7. No geral, estas bacias apresentam pequena *área acima de 30°* (A_{30}), com os menores valores dentre as bacias, variando de 1,45 a 9,51%, e menor amplitude altimétrica (H), com valores entre 641,2 e 1039m, variando de 641 a 917m para a maioria destas bacias, com exceção dos valores obtidos para a B23. Os demais parâmetros possuem resultados variados, com *inverso da área* ($1/A$) entre 0,01 e 0,095, sendo o maior obtido para B6, a menor bacia da área de estudo; *declividade média do canal principal* (S_L) entre 6,7 e 12°, com o menor valor obtido nesta classe e para as demais bacias do GCCS, para a B12 e; *inverso do índice de circularidade* ($1/Ic$) entre 1,35 e 2,63.

As bacias com índice de criticidade entre 3,4 e 4,5 (B25, B3, B24, B8, B22 e B15) são as bacias de **Média Suscetibilidade**. Estas bacias possuem características variadas: *área acima de 30°* (A_{30}) entre 15,28 e 20,73%, com valores inferiores à média das bacias, com exceção do resultado obtido para B15 (20,7%); *inverso da área da bacia* ($1/A$) entre 0,005 e 0,052; *amplitude altimétrica* (H) entre 977,6 e 1139m; *declividade média do canal principal* (S_L) entre 7,1 e 15°, com o maior valor para B15, que também apresentou o maior valor em relação as demais bacias da área de estudo e; *inverso do índice de circularidade* ($1/Ic$) entre 1,52 e 3,45.

As bacias de **Alta Suscetibilidade** obtiveram índice de criticidade entre 5,1 e 6,3, sendo elas: B13, B11, B19, B9, B21 e B10. Estas bacias possuem valores de *área acima de 30°* (A_{30}) entre 23,61 e 27,58% e *amplitude altimétrica* (H) entre 992,41 e 1157,95m, com ambos os parâmetros para esta classe com valores superiores à média. Os parâmetros de *declividade média do canal principal* (S_L), *inverso da área da bacia* ($1/A$) e *inverso do índice de circularidade* ($1/Ic$) apresentaram valores variados: S_L entre 8,67 e 10,67; $1/A$ entre 0,016 e 0,047 e; $1/Ic$ entre 1,75 e 3,13.

Por fim, as bacias classificadas como de **Muito Alta Suscetibilidade** são as bacias B20, B5, B4, B7 e B18 que apresentaram índice de criticidade entre 7,1 e 8,7. No geral, estas bacias apresentam elevada *área acima de 30°* (A_{30}), com os maiores valores dentre as bacias, variando de 31,82 a 48,06%, e elevada amplitude altimétrica (H), com valores entre 1018,72 e 1183,62m. O resultado dos demais parâmetros morfométricos obtidos para esta classe foram: *declividade média do canal principal* (S_L) entre 8,82 e 14,57°; *inverso da área da bacia* ($1/A$) entre 0,014 e 0,074 e; *inverso do índice de circularidade* ($1/Ic$) entre 1,75 e 2,94.

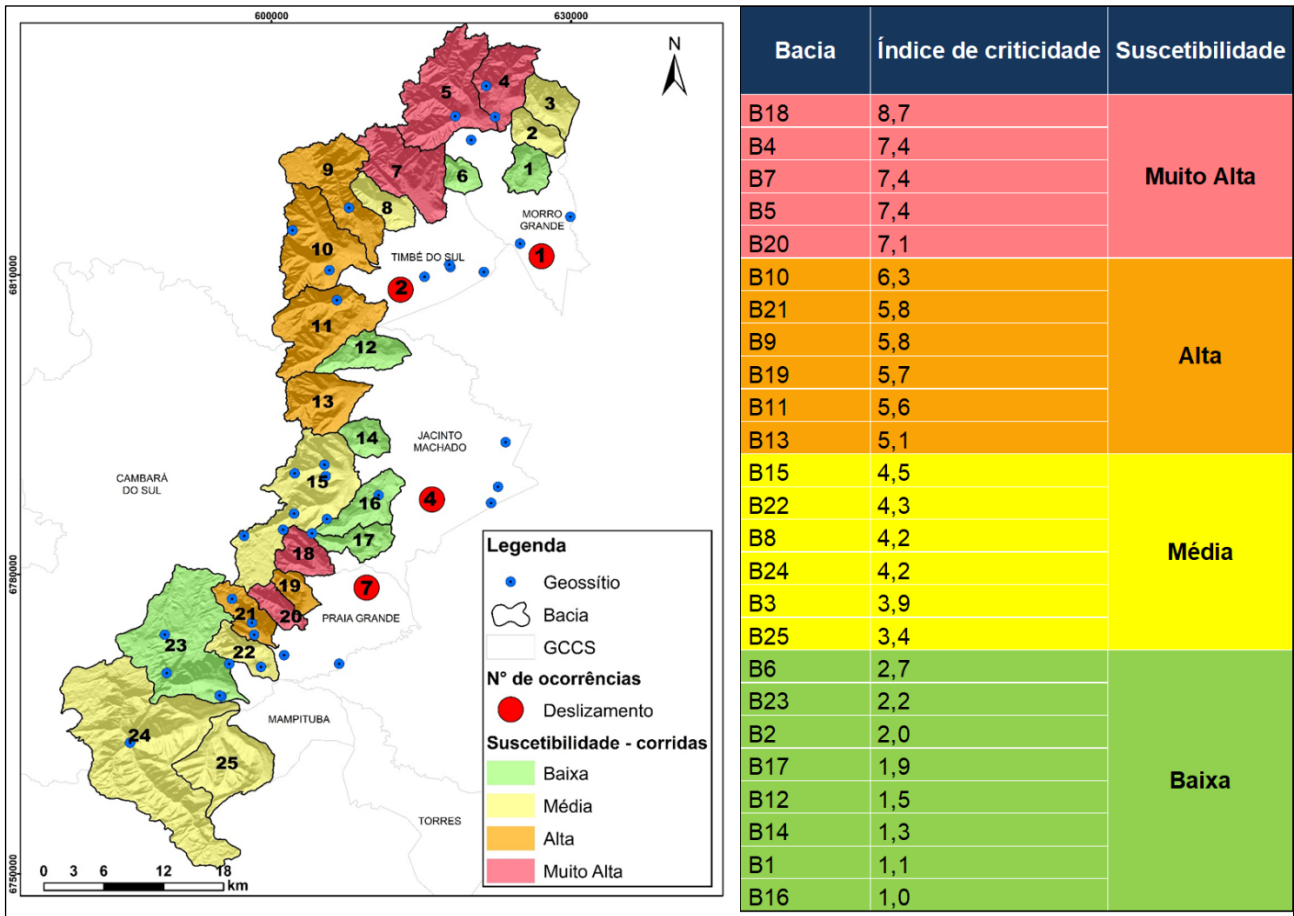


Figura 5 – Resultado da classificação da suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos para as bacias de drenagem. À direita, localização das bacias, dos geossítios e número de ocorrência de deslizamentos por municípios. À esquerda, índice de criticidade das bacias e classificação da suscetibilidade.

Os parâmetros que apresentaram maior peso na determinação de bacias de Muito Alta Suscetibilidade são: A_{30} , H e S_L . Tendo em vista que as corridas de detritos são processos induzidos pela gravidade (COSTA, 1984), a amplitude altimétrica e a declividade estão intimamente relacionadas com a suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas, sendo esperado que as bacias de maior suscetibilidade apresentem valores mais críticos para estes parâmetros. Assim, quanto maior a amplitude da bacia maior poderá ser a distância percorrida pela corrida e, portanto, maior será a quantidade de material remobilizado pelo fluxo, aumentando seu poder destrutivo. Gomes (2016) constatou que as bacias com ocorrência de eventos de maior magnitude possuem valores médios de H superiores aos das bacias com evidência de corridas de menor magnitude.

Os valores de A_{30} obtidos demonstram características relacionadas à morfologia do relevo, acusando o percentual da área escarpada. Diversos autores atribuíram valores críticos de declividade para a iniciação das corridas (COSTA, 1984; VAN DINE, 1996; KANJI e GRAMANI, 2001), entretanto, conforme a metodologia proposta por Gramani *et al.* (2005), os valores críticos de declividade são aqueles acima de 30°. Para as bacias classificadas como de Muito Alta

Suscetibilidade os valores de A_{30} demonstram que as bacias desta classe possuem aproximadamente 1/3 da área localizada acima de 30° , com quase 50% para a B5.

Quando consideradas as ocorrências de movimentos de massa nos municípios do GCCS, observa-se certa tendência de que as bacias com maior suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas estejam localizadas nos municípios com maior número de ocorrências de deslizamentos. O município de Praia Grande possui registro de sete ocorrências de deslizamentos, com duas bacias classificadas como de Muito Alta Suscetibilidade (B18 e B20) e outras duas de Alta Suscetibilidade. Já no município de Jacinto Machado, onde foram registradas quatro ocorrências de deslizamentos, apenas uma (B13) das seis bacias do município foi classificada como de Alta Suscetibilidade. Em Timbé do Sul, que registrou apenas duas ocorrências, das seis bacias existentes, três foram classificadas como de Alta Suscetibilidade (B11, B10 e B9) e uma de Muito Alta Suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas (B7). Por fim, no município de Morro Grande, que apresenta apenas um registro de ocorrência de deslizamento, duas bacias (B4 e B5) foram classificadas como de Muito Alta Suscetibilidade.

Ainda que as bacias de maior suscetibilidade se encontrem em áreas que possuem registro de deslizamentos, a relação entre a classificação das bacias com o registro de ocorrências de movimentos de massa no GCCS possui limitações. O levantamento das ocorrências de eventos extremos nos municípios do GCCS entre 1974 e 2017 (PIMENTA *et al.*, 2018), foi realizado a partir da coleta de dados secundários, com intuito de elaborar um histórico da ocorrência destes eventos. Contudo, o inventário não apresenta as coordenadas ou sub-bacias atingidas, com a localidade (por bairros) citada apenas em alguns registros, e as tipologias de processo de movimento de massa não são diferenciadas, sendo referidas genericamente como “deslizamentos”. Além disso, vale destacar que os registros destes eventos são realizados em função do fator humano, ou seja, para que estes eventos sejam registrados é necessário o relato por parte da população, inferindo que os locais com maior adensamento populacional possuam também maior número de registros, enquanto nas áreas protegidas, os registros tendem a ser mais escassos. Ressalta-se que as áreas de alta declividade que, conforme demonstrado, possuem maior suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos, são áreas protegidas ou com fatores limitantes à ocupação humana. Dessa forma, estima-se que o número de ocorrências de movimentos de massa seja muito superior ao inventariado.

Por fim, o resultado da classificação da suscetibilidade das bacias ao desenvolvimento de corridas de detritos foi realizado a partir da ponderação entre os parâmetros, de forma que o resultado da classificação não resulta em uma real suscetibilidade morfométrica à ocorrência de corridas, mas uma hierarquização das bacias de drenagem consideradas. Dessa forma, as bacias de Baixa Suscetibilidade não possuem, necessariamente, uma baixa suscetibilidade a ocorrência deste processo, mas possuem menor suscetibilidade em relação as demais bacias da área, tendo em vista toda a área do GCCS possui evidências de movimentos de massa (DUARTE, 1995).

Em relação ao método utilizado para a avaliação da suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos, a partir do índice de criticidade proposto por Gramani *et al.* (2005), cabe destacar que a metodologia foi elaborada com base na experiência desses autores no compartimento geológico-geomorfológico da Serra do Mar e elaborada para a utilização neste mesmo contexto. Dessa forma, os resultados da suscetibilidade a corridas devem ser utilizados com atenção. Contudo, apesar dos resultados apresentarem uma suscetibilidade relativa entre as bacias, entende-se que as bacias da área de estudo são naturalmente suscetíveis a estes processos, uma vez que são encontradas diversas evidências, a partir de cicatrizes de escorregamentos e depósitos colúvio-aluviais. Além disso, nota-se que muitas das bacias classificadas como de Muito Alta e Alta Suscetibilidade possuem geossítios presentes em sua área de drenagem, demonstrando a importância da identificação da suscetibilidade das bacias inclusive para a visitação segura dos visitantes do GCCS.

5. Considerações finais

A determinação da suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos no GCCS demonstra que grande parte das bacias possui características que apontam para uma elevada suscetibilidade a ocorrência deste processo. Da mesma forma, os registros de ocorrência de eventos extremos no território do GCCS, bem como as evidências existentes, corroboraram com este resultado, demonstrando que não é incomum a ocorrência destes processos na área de estudo, ainda que o inventário apresente limitações.

A morfometria da área de estudo demonstra a importância dos cursos d'água na configuração do relevo, a partir de processos de incisão fluvial e ajuste do nível de base, que por sua vez, condicionam maior ou menor energia dos processos hidrogeomorfológicos. Os parâmetros que apresentaram maior peso na determinação de bacias de Muito Alta Suscetibilidade foram A_{30} , H e S_L , sendo esperado que as bacias de maior suscetibilidade apresentem valores mais críticos para estes parâmetros, uma vez que as corridas de detritos são processos induzidos pela gravidade e são intimamente relacionados com a declividade e gradiente altimétrico da bacia.

O método utilizado para a avaliação da suscetibilidade ao desenvolvimento de corridas de detritos possui limitações devido, principalmente, ao fato de terem sido elaboradas para processos diferenciado ou em áreas com características fisiográficas diferenciadas. A realização de trabalhos futuros que envolvam a identificação em campo de evidências da ocorrência de corridas de detritos de diferentes magnitudes poderá contribuir para a validação da suscetibilidade determinada a partir dos parâmetros morfométricos.

6.Referências

- CABRAL, V. C. *et al.* Characterization of a landslide-triggered debris flow at a rainforest-covered mountain region in Brazil. **Natural Hazards**, n. 0123456789, 2021.
- CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres: desastres naturais**. Ministério da Integração Nacional, Brasília, 2003.
- CHEREM, L. F. S. *et al.* **Morfometria das bacias**. In: BARROS, A. P. M. *et al.* Hidrogeomorfologia: Formas, processos e registros sedimentares fluviais. [S. l.]: Editora Bertrand Brasil, 2020.
- CORRÊA, C. V. S. **Modelagem morfométrica para avaliação da potencialidade de bacias hidrográficas a corridas de detritos: proposta aplicada em Caraguatatuba (SP) e São Sebastião (SP)**. Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis. 2018. 278 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2018.
- COSTA, J. E. **Physical geomorphology of debris flows**. In: Costa, J. E., and Fleisher, J. P., eds., *Developments and applications of geomorphology*, New York: Springer-Verlag. p. 268 – 317, 1984.
- DE SCALLY, F.; SLAYMAKER, O.; OWENS, I. Morphometric Controls and Basin Response in the Cascade Mountains. **Geografiska Annaler** n°83, p.117-130, 2001.
- DIAS, VIVIAN CRISTINA; *et al.* Morphometric and morphological parameters as indicators of the magnitude of debris flow in Serra do Mar Paulista. **Confins (Paris)**, v. 29, p. 1-20, 2016.
- DUARTE, Gerusa Maria. **Depósitos Cenozóicos Costeiros e a Morfologia do Extremo Sul de Santa Catarina**. Tese de Doutorado. Universidade da São Paulo, 1995.
- FLORES, J. A. A.; LISBOA, N. A.; BAPTISTA, P. R. D. Caracterização morfotectônica e morfoestrutural do sudeste de Santa Catarina. **Geociências**, v.2, p. 61-70, 1993.
- GOMES, M. C. V. **Corridas de detritos e as taxas de denudação a longo-termo da Serra do Mar/SP**. Tese de Doutorado (Doutora em Geografia) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2016.
- GRAMANI, M. F. *et al.* Análise da potencialidade de geração de corridas de massa nos trechos serranos do duto OSBAT. 11º **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**. Anais. Florianópolis, 15p, 2005.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP. **Estações convencionais/Série histórica/Dados Mensais**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>>. Acesso em: jan, 2020.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Reconhecimento, caracterização e monitoramento de locais potencialmente sujeitos a instabilizações na Serra do Mar na área de influência dos diversos Sistemas de Captação e Abastecimento de Água e de Tratamento de Esgoto. São Paulo, **Relatório 59.123**, 2002.
- JAKOB, M. **Morphometric and Geotechnical Controls on Debris Flow Frequency and Magnitude in Southwestern British Columbia**. Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, 1996.
- KANJI, M. A.; GRAMANI, M. F. Metodologia para determinação da vulnerabilidade a corridas de detritos em pequenas bacias hidráulicas. **III Conferencia Brasileira de Estabilidade de Encostas (III COBRAE)**, Rio de Janeiro, 2001.
- KELLER, E. A. **Introduction to environmental geology**. 4. ed. [S. l.: s. n.], 1992.
- MORISAWA, M. E. Quantitative Geomorphology of some Watersheds in the Apalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, 1962.
- NERY, T. D. **Dinâmica das corridas de detritos no Litoral Norte de São Paulo**. 2016. Tese de Doutorado (Doutora em Geografia) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2016.

PELLERIN, J. et al. Timbé do Sul – Jacinto Machado: Avaliação preliminar da extensão da catástrofe de 23-24/12/95. **Geosul**, Florianópolis, v.12, n. 13, 1997.

PIMENTA, L. H. F et al. **Plano Integrado e Participativo de Gestão de Risco de Desastres no Território do Projeto do Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul**, 2018.

PISSARRA, T *et al.* Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo: SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO**, [s. l.], 2004.

SANTOS, Y. R. F. **Cartografia geomorfológica de detalhe aplicada ao geopatrimônio: geomorfossítios do projeto Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul SC/RS**. 2020. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2021.

VALDATI, J. **Riscos e desastres naturais: área de risco de inundação na sub-bacia do rio da pedra - Jacinto Machado/SC**. 2000. Dissertação de Mestrado (Mestre em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2000.

VAN DINE, D. F. **Debris flow control structures for forest engineering**. Res. Br., B. C. Min. For., Victoria, B. C., Work. Pap. 75p, 1996.

VIEIRA, B.C.; VIEIRA, A.C.F.; FERNANDES, N.F; AMARAL, C.P. Estudo Comparativo dos Movimentos de Massa Ocorridos em Fevereiro de 1996 nas Bacias do Quitite e do Papagaio (RJ): Uma Abordagem Geomorfológica. **2nd. Pan-American Symposium on Landslides/ 2nd. Brazilian Conference on Slope Stability**, pag.165 – 164., 1997.