


## Aplicação de índices morfométricos para a estimativa de corridas de detritos em sub-bacias do Rio Perequê, Cubatão (SP)

*The use of morphometric indexes to evaluate the potential for debris-flow occurrence in sub-catchments of the Perequê River, Cubatão (SP)*

Natália Rafaela de Almeida<sup>1</sup> , Fábio Augusto Gomes Vieira Reis<sup>1</sup> , Victor Carvalho Cabral<sup>1</sup> ,  
Claudia Vanessa dos Santos Corrêa<sup>1</sup> , Rebeca Meyer Isler<sup>1</sup> , Vinicius Queiroz Veloso<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia Aplicada e Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo, Avenida 24-A, 1.515, Bela Vista, CEP: 13.506-900, Rio Claro, SP, BR (natyralm@yahoo.com.br; fabio.reis@unesp.br; victor.carvalho@unesp.br; claudia.correa@unesp.br; rebecca.meyer@unesp.br; vinicius.veloso@unesp.br)

Recebido em 8 de julho de 2019; aceito em 7 de fevereiro de 2023.

### Resumo

As corridas de detritos são processos hidrogeomorfológicos comumente associados a altos índices pluviométricos em áreas declivosas. A Serra do Mar possui características geomorfológicas e climáticas que a tornam favorável à iniciação desse fenômeno, sendo a região de Cubatão (SP) uma das mais afetadas no Brasil. Este trabalho objetiva analisar a potencialidade à deflagração de corridas de detritos em sub-bacias do Rio Perequê, com base em índices morfométricos na escala de 1:50.000. Para tal, 13 sub-bacias foram selecionadas devido ao seu alto histórico de eventos do respectivo processo. Os resultados mostram que a sub-bacia número 04, a qual compreende a Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras, exibe a maior potencialidade em toda a área de estudo, devido aos seus elevados valores de Relação de Relevo (Rr), Índice de Rugosidade (Ir), Índice de Força do Canal (IFC) e Índice de Sinuosidade (Is). O cálculo dos índices morfométricos mostra-se, portanto, como uma ferramenta valiosa na avaliação e identificação das áreas com altos potenciais para corridas de detritos, especialmente na avaliação da potencialidade em tomadas de decisão em escalas regionais.

**Palavras-chave:** Escorregamentos; Processos Hidrogeomorfológicos; Geomorfometria; Serra do Mar.

### Abstract

Debris flows are hydrogeomorphological processes commonly associated with high rainfall in sloping areas. The geomorphology and climate of the Serra do Mar Mountain range increases the initiation potential of debris flows, which are particularly recurrent in the region of Cubatão (São Paulo State). The aim of this study was to analyze the potential for debris-flow initiation in sub-catchments of the Perequê River, based on morphometric indexes calculation at a 1:50,000 scale. To this end, 13 catchments were selected, due to the extensive history of debris-flow events. Results show that catchment number 04, which includes "Presidente Bernardes — Petrobras" Refinery, was the one with the greatest debris-flow initiation potential in the entire study area, due to its high values of Relief Ratio (Rr), Roughness Index (Ir), Stream Power Index (SPI), and Sinuosity Index (Is). The calculation of morphometric indices is, therefore, a valuable tool in the evaluation and identification of high potential areas for debris-flow occurrence, especially in the potentiality evaluation for decision-making at regional scales.

**Keywords:** Landslides; Hydrogeomorphological processes; Geomorphometry; Serra do Mar.

## INTRODUÇÃO

Regiões que possuem relevos montanhosos são suscetíveis a processos hidrogeomorfológicos, como escorregamentos e corridas de detritos, o que pode ocasionar grandes desastres e conseqüentemente colocar em risco a vida humana e as infraestruturas (Alcántara-Ayala, 2019). Esses processos, segundo Sidle et al. (1985), são modeladores da paisagem e bastante comuns em regiões declivosas.

As corridas de detritos são processos de movimentos de massa considerados naturais. No entanto, podem estar condicionadas a fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos (Wilford et al., 2004). O fenômeno ocorre principalmente nas porções montanhosas do mundo e, no Brasil, a região da Serra do Mar é um dos principais locais de ocorrência (Gramani, 2001; Kanji et al., 2008; Nery, 2016). Para que corridas de detritos sejam deflagradas, é necessário que haja mobilização rápida de materiais que podem ser de diversas naturezas. Desta forma, Takahashi (1981) define corridas de detritos como processos caracterizados por uma movimentação na forma de escoamento em canais de drenagem, envolvendo fluidos geralmente densos, composto por material grosseiro (blocos de rochas) e material fino (solos), bem como restos vegetais e quantidades variáveis de água. IPT (1987) e Gramani (2001) ainda complementam que esses processos podem percorrer grandes distâncias, mesmo em regiões onde o relevo é mais suave.

Na catástrofe de 06 de fevereiro de 1994, muitos danos e perdas foram registrados em Cubatão, principalmente na área industrial da Refinaria Presidente Bernardes (RPBC). O evento foi marcado por centenas de escorregamentos que rapidamente evoluíram para corridas de detritos, atingindo a planta da refinaria a jusante da drenagem principal (Gramani, 2001). Ainda, de acordo com Massad et al. (2009), a Petrobras teve prejuízos na ordem de US\$ 40 milhões devido à paralisação das atividades para limpeza e desobstrução do pátio atingido pelo fluxo, estimado em aproximadamente 300.000 m<sup>3</sup> de materiais transportados (incluindo água, areia e solo fino, material vegetal como troncos de árvores e blocos de rochas).

O estudo da morfometria de uma bacia hidrográfica pode fornecer informações cruciais para o entendimento do comportamento das corridas de detritos (Lima et al., 2020). Índices morfométricos são formas de análises quantitativas dos dados das bacias, onde, se relacionados entre si, geram as informações necessárias sobre a geometria da mesma. Horton (1945) foi o pioneiro nos estudos da morfometria de bacias hidrográficas e, em meados de 1940, definiu como sendo uma maneira de “medir as formas do relevo”. Jakob (1996) menciona que os índices morfométricos quando combinados entre si auxiliam no entendimento da dinâmica e magnitude dos processos de corridas de detritos.

Ademais, de acordo com Wilford et al. (2004), os índices morfométricos são considerados fatores internos de uma bacia que são capazes de influenciar diretamente na dinâmica de corrida de detritos e podem ser acrescidos por outros fatores, como a permeabilidade do solo e textura, e a precipitação de alta intensidade contribui de maneira expressiva na deflagração desses processos. A respeito desse último agente deflagrador, cabe destacar que especialmente as chuvas que ocorrem em curtos períodos de tempo (poucos minutos a horas), após um período de pluviosidade anterior, mesmo de pequena intensidade, são capazes de condicionar corridas de detritos (Starkel, 1979; Caine, 1980; Kanji et al., 1997).

Assim, o objetivo desta pesquisa é analisar a potencialidade para a ocorrência de corridas de detritos a partir do emprego de índices morfométricos nas sub-bacias do Rio Perequê, Cubatão (SP), e estabelecer critérios de hierarquização da potencialidade destas sub-bacias para esse tipo de evento.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para pesquisa se localiza na Serra do Mar, sendo que sua maior parte está situada no município de Cubatão, na região da Baixada Santista do estado de São Paulo. As bacias hidrográficas de estudo estão localizadas a aproximadamente 57 km da capital São Paulo e englobam, ainda, pequenas porções de outros municípios como São Bernardo do Campo e Santo André. A Figura 1 apresenta a área definida para pesquisa em relação à sua localização quanto ao Brasil e ao estado de São Paulo, também com destaque para a área da Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras.

### Geologia e tectônica

O município de Cubatão está inserido no contexto geológico da Província Mantiqueira, composta por fragmentos crustais de idades distintas e evoluções tectônicas complexas (Campanha e Sadowsky, 1999). Almeida et al. (1977) definem a Província Mantiqueira como uma faixa de aproximadamente 3.000 km de comprimento paralela à costa atlântica do sudeste e sul do Brasil, com a mesma direção NE-SW da linha de costa do continente. Três cinturões orogênicos compõem a Província Mantiqueira: Araçuaí, Tijuca e Ribeira (Hasui, 2012). É considerada a feição orográfica mais representativa da borda atlântica do continente sul-americano (Almeida e Carneiro, 1998).

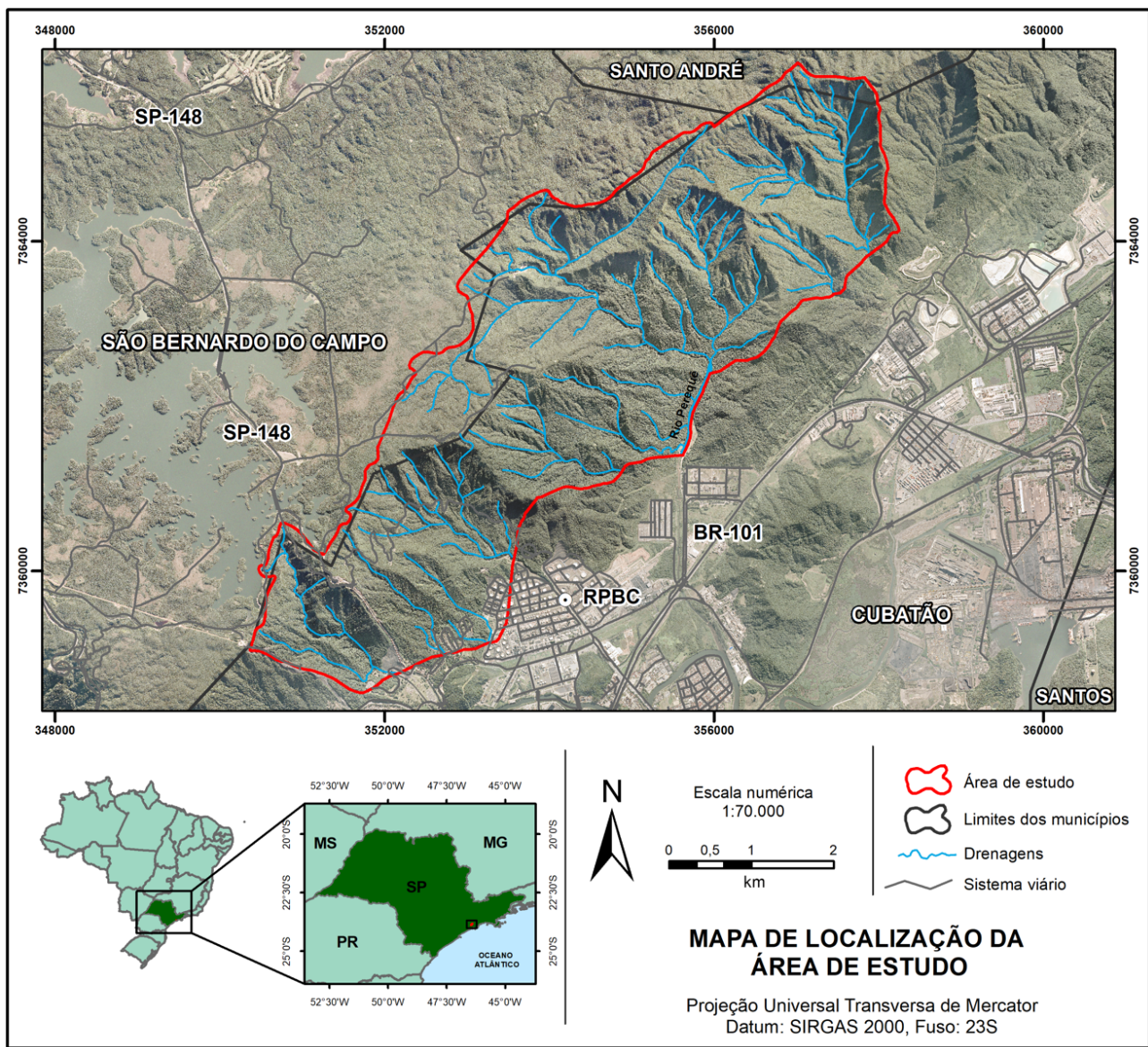
A evolução geológica desses relevos da margem passiva do Sudeste do Brasil foi associada aos períodos Mesozoico e Cenozoico, marcados tanto por fatores tectônicos e isostáticos, quanto climáticos (Ribeiro et al., 2011).

O IPT (1986) subdivide o Cinturão Ribeira em Bloco Juquitiba (Grupo Açungui) a norte e Complexo Costeiro a sul, e estes estão basicamente separados pela zona de falhamentos transcorrentes denominada de Falha de Cubatão. O Grupo Açungui é pertencente ao éon Proterozoico e o Complexo Costeiro ao Arqueano (IPT, 1986) (Figura 2).

Na região de estudo, o Grupo Açungui também se divide em Complexo Pilar e Complexo Embu. O Complexo Embu é composto por migmatitos estromatíticos e o Complexo Pilar por mica-xistos, filitos e rochas calcossilicatadas (IPT, 1986). No Complexo Costeiro foram mapeados e caracterizados migmatitos que passam a granitóides e migmatitos gnáissicos (IPT, 1986). Também foram encontrados trechos

com coberturas recentes de idade Cenozoica compostas por depósitos fluviais, areias e argilas e depósitos flúvio-lagunares (IPT, 1986) (Figura 2).

Tectonicamente, a área possui uma grande zona de falhamentos transcorrentes designada Falha de Cubatão (Figura 2). Esse trecho é referente a uma zona extensa, com aproximadamente 300 km de largura e direções predominantes N50E e N70E (Sadowsky, 1991). O tipo de falhamento é transcorrente dextral, com algumas ocorrências de cavalgamentos nas regiões mais próximas ao município de Santos (Sadowsky, 1991). Almeida (1986) também cita a presença de enxames de diques de diabásio, dispostos nas direções principais de NE-ENE.



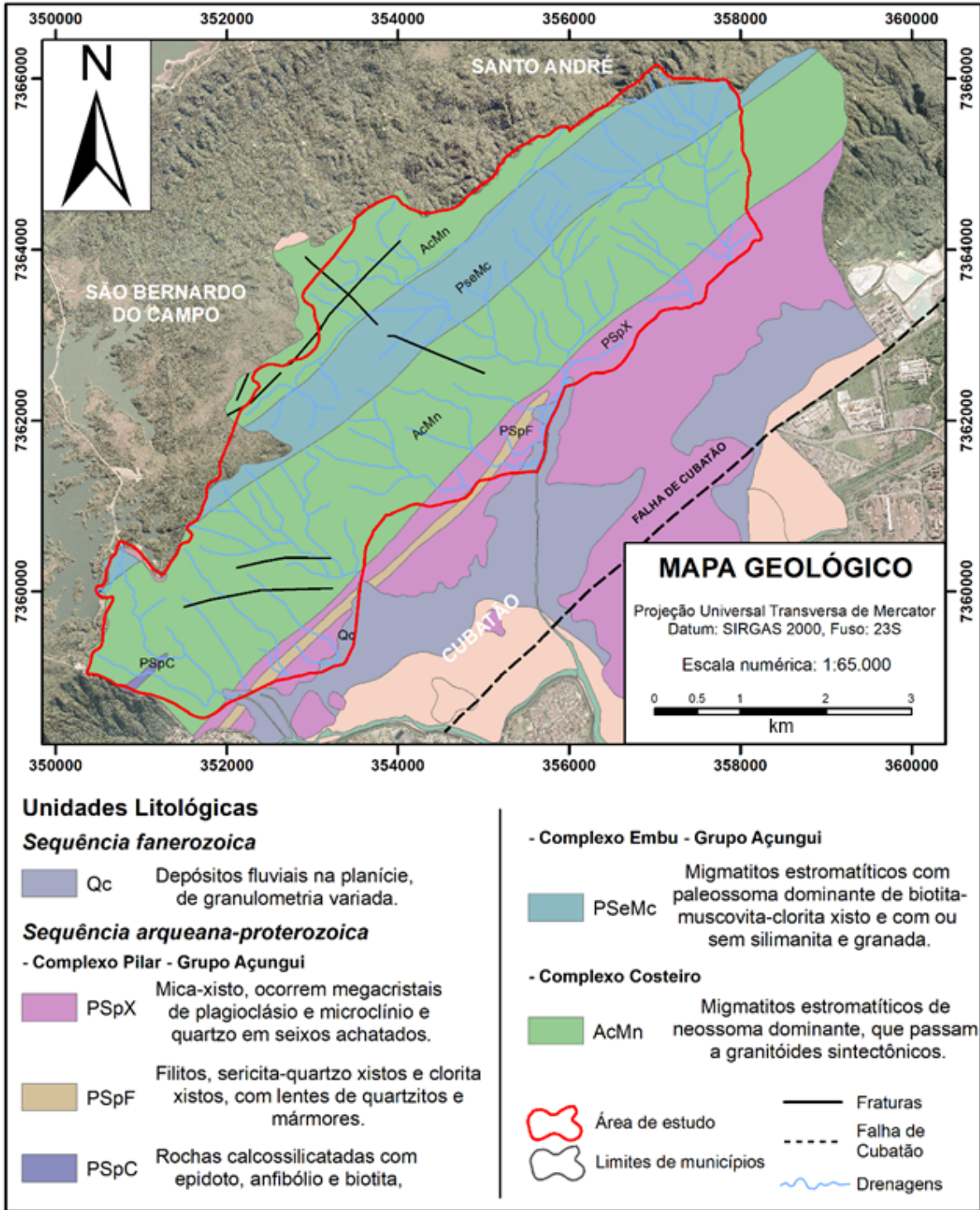
Fonte: Elaborado pelos autores a partir das cartas topográficas 1:50.000 do IBGE e ortofotos da Emplasa (2011).

**Figura 1.** Mapa de localização da área de estudo.

**Geomorfologia**

A Serra do Mar se estende desde o Planalto Atlântico até a fronteira com a Baixada Marinha. Sua extensão chega a

1.500 km de comprimento e 10 km de largura, e compreende desde o estado de Santa Catarina até o Rio de Janeiro, acompanhando a direção NE-SW, conforme o litoral sudeste do país (Santos et al., 2009).



Fonte: IPT (1986), modificado pelos autores.

**Figura 2.** Mapa Geológico da área de estudo.

Ponçano et al. (1981) caracterizam a região de Cubatão em três compartimentos:

- Planalto: relevo de morros suaves e espigões, com altitudes na faixa de 715 a 900 m. Na parte norte deste planalto, localiza-se a bacia sedimentar de São Paulo, enquanto a parte sul já se encontra próxima das Serras do Mar e de Paranapiacaba. Almeida (1958) denomina esse compartimento como “Província Geomorfológica do Planalto Atlântico”;
- Serraria Costeira: representa a porção que interliga a região drenada do estado para o oceano. Mais conhecido como Serra do Mar, é constituído de um relevo predominantemente de escarpas abruptas e festonadas. O desnível varia de 800 até 1.200 m entre a borda do Planalto até a baixada litorânea. Possui vertentes com altos graus de inclinação, variando entre 35° e 55°, o que faz com que exista um gradiente hidráulico bastante elevado. Geomorfologicamente, a área de estudo concentra-se neste compartimento, o qual também é denominado de “Província Costeira” por Almeida (1958). Ademais, é possível observar neste compartimento anfiteatros que se separam entre si por espigões;
- Planície Costeira: composto por localidades com relevos aplainados e presença de possíveis oscilações de marés. Podem ser encontrados pequenos morros isolados, onde as altitudes chegam a variar de 80 a 120 m.

Ainda, pode-se destacar nas proximidades da área estudada a feição geomorfológica onde se encaixa o Rio Cubatão, denominada de Falha de Cubatão, formando-se, assim, vales que acompanham a direção geral da falha, NE-SW (Lopes, 2006).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Levantamento bibliográfico e aquisição da base cartográfica

Inicialmente realizou-se análises em materiais bibliográficos na literatura nacional e internacional e, em seguida, foram adquiridos os dados que compuseram a base cartográfica da pesquisa: Mapa Topográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em escala 1:50.000; Mapa Geológico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em escala 1:50.000; Ortofotos da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA) com *Ground Sampling Distance* (GSD) de 4m, e Fotografias aéreas do acervo da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em escala 1:25.000.

### Delimitação da área de pesquisa, divisão em sub-bacias e mapeamento de feições de corrida de detritos e escorregamentos em fotografias aéreas de 1994

A escolha da área de pesquisa foi conduzida após a análise de ocorrências de eventos de escorregamentos e corridas de detritos na região onde aconteceu o desastre em fevereiro de 1994.

Após definida a área da pesquisa, foram feitas as delimitações das sub-bacias, onde utilizou-se inicialmente o método da hierarquização das drenagens definido por Strahler em 1952 (*apud* Christofolletti, 1982). Essas drenagens foram extraídas do mapa topográfico do IBGE em escala 1:50.000 e, na sequência, foram numerados os cursos d’água conforme o número de tributários que este possui. Por exemplo, uma drenagem sem tributários recebe a numeração 1, sendo assim de primeira ordem; quando se encontra com outra sem tributários formando uma bifurcação, esta recebe a numeração 2, ou segunda ordem, e assim por diante, até que seja finalizada a numeração na drenagem principal. Essa classificação foi importante para englobar, em cada sub-bacia, todas as drenagens que deságuam em um mesmo rio, podendo este ser considerado o rio principal da sub-bacia (o de maior ordem hierárquica).

Após a definição das drenagens que iriam compor cada sub-bacia, foi necessário delimitar seu traçado, e para isso foram observados os divisores de águas através das cartas topográficas do IBGE em escala 1:50.000, sempre respeitando a hierarquização das drenagens, conforme feito anteriormente.

Complementarmente foram extraídas, em fotografias aéreas ortorretificadas do ano de 1994, as cicatrizes de escorregamento e os depósitos de corridas de detritos a partir de técnicas fotointerpretativas, baseadas nos seguintes critérios: ausência de vegetação, textura, posicionamento na encosta e forma (Loch, 1984; Lopes et al., 2007), para os escorregamentos; e, para as corridas, a morfologia do depósito, cor (geralmente esbranquiçada), localização (ao longo dos canais de drenagens) e formato (Guzzetti et al., 2012; Sestini e Florenzano, 2014).

Cabe salientar que por se tratar de um evento de grande magnitude e generalizado, muitas das feições analisadas nas fotos aéreas ficaram impossíveis de ser distinguidas entre cicatriz de escorregamento ou cicatriz de corrida de detritos. Nesse sentido, optou-se em integrá-las e denominá-las de “feições de corrida de detritos e escorregamentos”, uma vez que na região da Serra do Mar são comuns as corridas de detritos do tipo primárias, caracterizadas pela mobilização dos materiais de escorregamentos translacionais e rotacionais das encostas até os canais de drenagem (Kanji et al., 2003; Corrêa et al., 2021).

## Cálculo dos índices morfométricos

Para a realização dos cálculos dos índices morfométricos, primeiramente, foi necessário extrair as informações de interesse diretamente das cartas topográficas do IBGE em escala 1:50.000, sendo estas as curvas de nível e as malhas de drenagens. Uma vez que as sub-bacias já haviam sido definidas em etapas anteriores, o primeiro dado obtido foi a área (A). Em seguida foram calculados os comprimentos (Lh) de cada sub-bacia. Para a definição da amplitude e amplitude máxima (H e Hm) foi necessária a utilização dos dados hipsométricos extraídos da carta do IBGE, o que possibilitou o cálculo das diferenças entre as cotas existentes em cada sub-bacia.

Em seguida, uma vez que já tinha sido obtida a malha das drenagens em cada sub-bacia, foi possível a realização dos cálculos do comprimento das drenagens total (Lt), comprimento da drenagem principal (Lp) e comprimento da drenagem principal medido de forma vetorial (dv). Por fim, obteve-se, ainda, os valores de altitudes máximas ( $a_{max}$ ) em cada sub-bacia e ângulo de inclinação dos canais principais ( $\tan \beta$ ).

Todos esses dados mencionados foram considerados como parâmetros morfométricos, pois tratam-se de dados necessários que fornecem valores primários para os cálculos dos índices morfométricos. Com esses dados, passou-se para as aplicações das equações (Tabela 1), as quais foram denominadas de índices morfométricos, pois tratam-se da relação de dois ou mais parâmetros morfométricos. Assim, foi possível obter os seguintes índices:

- Densidade de drenagem (Dd): corresponde à resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica (Hajam et al., 2013);
- Relação de relevo (Rr): possui associação direta com os processos erosivos, que podem atuar nas encostas de

uma bacia, e representa a capacidade de transporte de sedimentos (Hajam et al., 2013);

- Índice de rugosidade (Ir): quanto mais elevado esse índice, maior será a taxa de produção de sedimentos e, conseqüentemente, maior será a disponibilidade de sedimentos para transporte durante eventos de corridas de detritos (Strahler, 1958 *apud* Christofolletti, 1982);
- Índice de força do canal (IFC): mede a força erosiva dos fluxos d'água e se relaciona diretamente com a área da bacia (A) e a inclinação das encostas (Conforti et al., 2011);
- Gradiente do canal (Gc): auxilia no reconhecimento de possíveis locais de deposições de sedimentos, os quais podem ser definidos como áreas fontes para corridas de detritos (Nery, 2016);
- Índice de sinuosidade (Is): quanto maior seu valor, maior será a sinuosidade do canal, e menor será a velocidade que o fluxo adquire durante um processo de corrida de detritos (IPT, 2014).

## Forma de análise dos resultados obtidos

Os índices morfométricos foram analisados de forma integrada. Para isto, foi necessário que os resultados fossem divididos em três classes de potencialidade, sendo elas: baixa, média e alta. Essa etapa da análise é derivada da aplicação em cálculos estatísticos para representar a distribuição da frequência que os dados obtidos podem possuir (Battisti e Battisti, 2008). Segundo Battisti e Battisti (2008), é necessário que se defina o número de intervalos que será utilizado e, após isso, realizar o cálculo da amplitude desses intervalos com a Equação 1:

$$hi = At / \sqrt{n} \quad (1)$$

**Tabela 1.** Equações utilizadas nos cálculos dos índices morfométricos e definições dos mesmos que foram utilizados para hierarquizar as potencialidades para geração de corridas de detritos.

Índices	Sigla	Unidade	Fórmula	Autores
Densidade de drenagem	Dd	$\frac{km}{km^2}$	$Dd = \frac{Lt}{A}$	Hajam et al. (2013)
Relação de relevo	Rr	$\frac{m}{km}$	$Rr = \frac{Hm}{Lh}$	Schumm (1956) e Hajam et al. (2013)
Índice de rugosidade	Ir	Adimensional	$Ir = HxDd$	Strahler (1958) <i>apud</i> Christofolletti (1982)
Índice de força do canal	IFC	Adimensional	$SPI = A * \tan\beta$	Conforti et al. (2011)
Gradiente do canal	Gc	$\frac{m}{km}$	$Gc = \frac{amax}{L}$	Nery (2016)
Índice de sinuosidade	Is	Adimensional	$Is = \frac{Lp}{dv}$	IPT (2014)

Em que:

$hi$  = tamanho do intervalo;

$At$  = amplitude total;

$\sqrt{n}$  = número de intervalos.

A primeira classe possui o limite inferior como sendo o valor mais baixo encontrado nos dados, e a este valor soma-se o resultado obtido em  $hi$ , estabelecendo-se, assim, o limite superior dessa classe; e assim sucessivamente até finalizar o número de classes escolhidos (Battisti e Battisti, 2008).

No caso dos dados obtidos na pesquisa, o valor referente à amplitude total equivale à subtração do valor maior pelo valor menor (de cada índice e parâmetro trabalhado). Esse valor conseguido na subtração foi dividido em três (que é o número de intervalos utilizados na análise) e obteve-se, assim, o  $hi$  (tamanho do intervalo). O  $hi$  é somado primeiramente ao menor valor do dado e obtém-se, assim, o primeiro intervalo. A partir deste valor, soma-se novamente

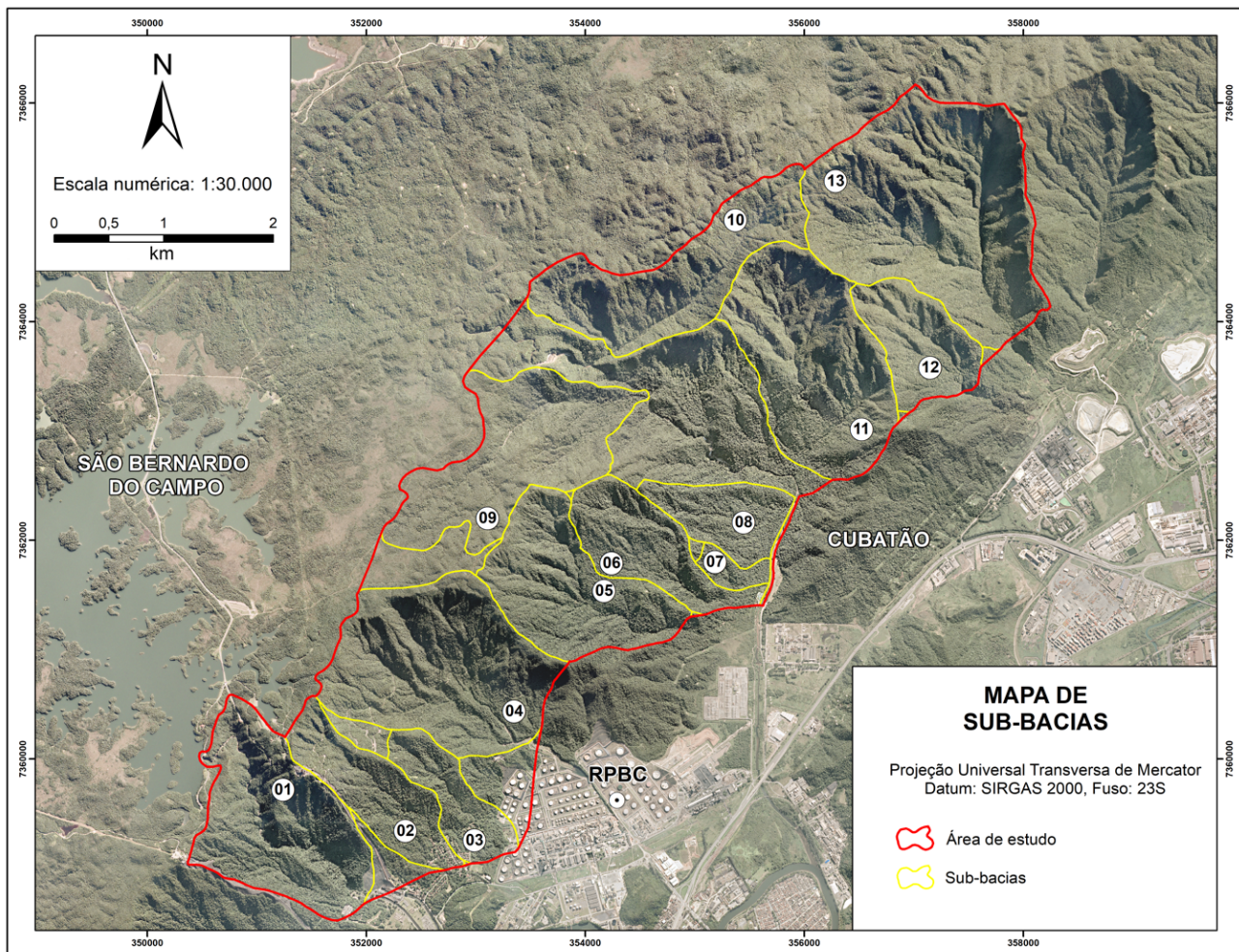
e obtém-se o segundo e, mais uma vez, tendo o terceiro e último intervalo. Salienta-se que algumas aproximações nos valores podem ser necessárias.

Por fim, para a classe que representa a maior potencialidade, foi atribuída a cor vermelha; para a média potencialidade, a cor amarela; e para a baixa potencialidade, a cor verde.

## RESULTADOS

### Mapa de sub-bacias

A área de estudo foi dividida em um total de 13 sub-bacias, as quais foram numeradas de 01 a 13 sequencialmente (Figura 3). Essas sub-bacias correspondem às regiões que possuem a maior frequência de feições de escorregamentos e corridas de detritos relativas ao evento ocorrido em fevereiro de 1994 no município de Cubatão (SP) (Figura 4).



**Figura 3.** Mapa com a delimitação de todas as sub-bacias que foram analisadas nesta pesquisa.

## Resultado dos cálculos dos parâmetros e índices morfométricos

O resultado dos parâmetros morfométricos e os resultados dos índices são exibidos a seguir (Tabelas 2 e 3).

A classificação hierárquica das sub-bacias analisadas na ordem de alto potencial para baixo potencial é apresentada na Tabela 4. Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3, as sub-bacias foram definidas como alta (vermelho), média (amarelo) e baixa (verde), e de acordo com cada índice analisado (Tabela 4).

## DISCUSSÃO

### Análise dos índices morfométricos

Em relação à Densidade de Drenagem (Dd), os valores obtidos variam entre 2,65 e 6,36 km/km<sup>2</sup>. Yildiz (2004) menciona que

os valores mais altos são referentes às bacias que possuem uma resposta hidrológica mais rápida, ou seja, com maior capacidade para escoar água e sedimentos, tornando um possível evento de corrida de detritos mais intenso. Sendo assim, têm-se que as sub-bacias de números 09, 02, 10, 01, 08, 05, 03 e 06 são as de menor potencial; as de números 11, 04, 12 e 13 de médio, e a única de alto potencial para geração de corridas de detritos é a 07.

Para o índice de Relação de Relevância (Rr), os valores encontrados estão entre 152,05 e 434,30 m/km. Cerri et al. (2018) definem este parâmetro como a capacidade que a sub-bacia possui para armazenar e transportar sedimentos. Portanto, maiores valores de Rr estão relacionados a um maior potencial de geração de corridas de detritos. Então, de acordo com os valores calculados, as sub-bacias 09, 10 e 03 possuem os menores potenciais à deflagração desses processos; 07, 01 e 13 registram médios potenciais; enquanto as sub-bacias 11, 06, 04, 02, 05, 08 e 12 apresentam alto potencial.

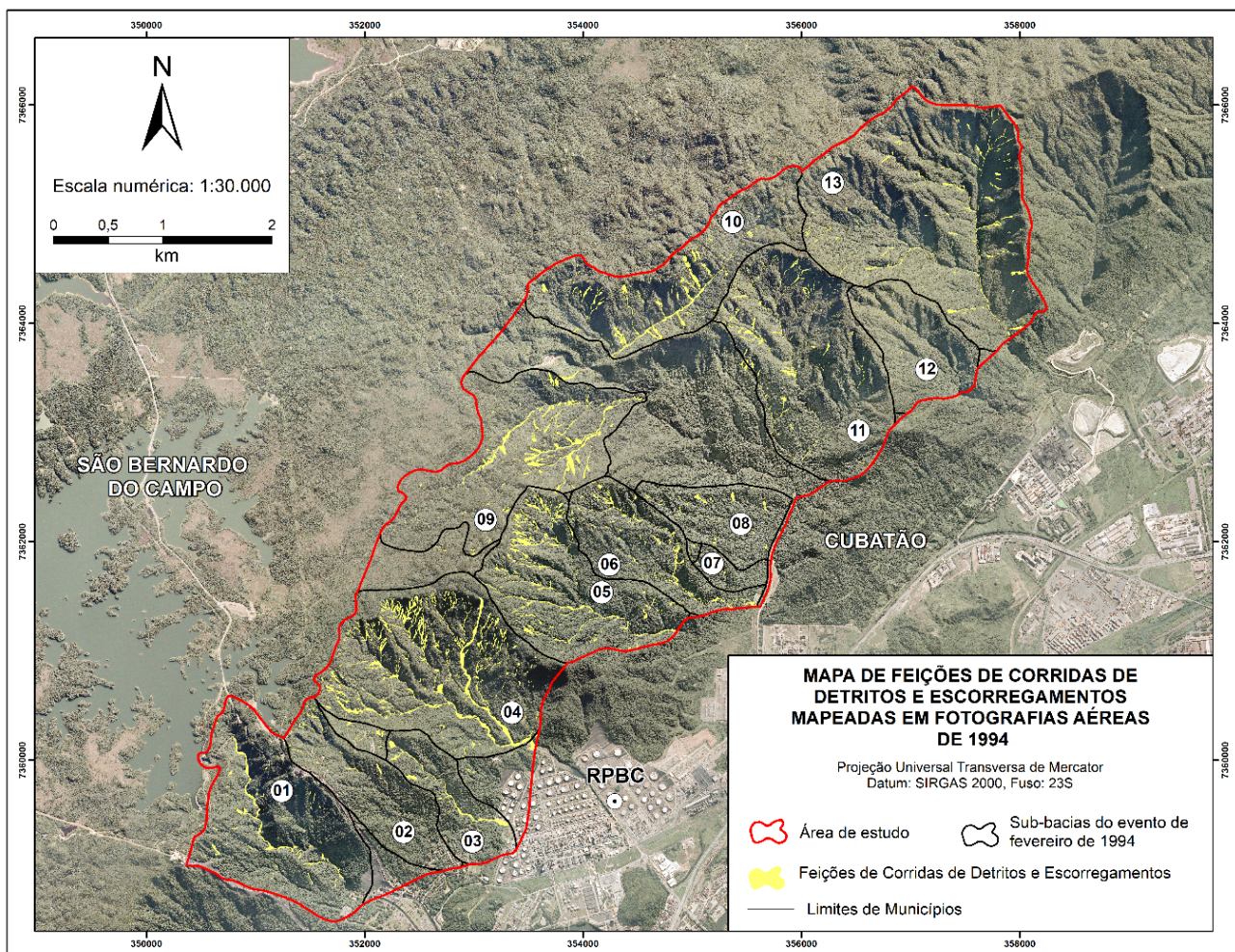


Figura 4. Mapa de feições de corrida de detritos e escorregamentos mapeadas em fotografias aéreas de 1994.



**Tabela 2.** Resultados dos cálculos dos parâmetros morfométricos.

Sub-bacia	Parâmetros Morfométricos							
	A (km <sup>2</sup> )	Lh (km)	H = Hm (m)	a <sup>max</sup> (m)	Lt (km)	Lp (km)	dv (km)	tg β (°)
01	1,98	2,21	720	740	5,51	2,60	2,16	13,90
02	0,96	2,02	720	740	2,55	2,07	1,96	20,25
03	0,63	1,58	360	380	2,20	1,61	1,48	15,44
04	2,54	2,03	720	800	9,99	2,13	2,06	19,00
05	1,61	1,94	700	780	5,28	2,10	1,78	21,80
06	0,99	1,86	660	680	3,53	2,58	1,91	16,30
07	0,17	0,67	180	200	1,05	0,97	0,60	12,50
08	0,67	1,35	500	520	1,86	1,50	1,19	21,40
09	7,19	3,85	760	780	6,43	2,83	2,67	10,76
10	1,75	2,43	440	900	4,71	2,44	2,38	10,50
11	2,27	2,25	780	840	8,89	2,39	1,99	18,00
12	0,86	1,43	620	720	3,54	1,49	1,39	24,40
13	3,49	2,49	820	940	14,55	2,69	2,40	16,50

**Tabela 3.** Resultados dos cálculos dos índices morfométricos.

Sub-bacia	Índices Morfométricos					
	Dd (km/km <sup>2</sup> )	Rr (m/km)	Ir	IFC	Gc (m/km)	Is
01	2,79	325,21	2.005,48	27,52	284,82	1,20
02	2,65	357,08	1.906,82	19,49	357,64	1,06
03	3,50	228,41	1.258,73	9,70	236,05	1,09
04	3,93	354,85	2.829,61	48,30	376,34	1,03
05	3,28	360,25	2.294,54	35,15	371,57	1,18
06	3,58	354,50	2.364,72	16,06	263,25	1,35
07	6,35	268,49	1.142,94	2,06	205,35	1,63
08	2,79	371,31	1.395,50	14,29	345,60	1,27
09	0,88	190	668,8	25,42	202,6	1,06
10	2,70	180,96	1.187,55	18,33	368,28	1,03
11	3,92	347,42	3.059,03	40,78	350,82	1,21
12	4,10	434,30	2.541,11	21,07	482,88	1,07
13	4,17	329,60	3.418,74	57,60	349,59	1,12

**Tabela 4.** Classificação hierárquica dos resultados dos índices morfométricos.

Índice morfométrico	Sub-bacia em ordem de maior potencialidade (vermelho) para menor potencialidade (verde)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dd	07	13	12	04	11	06	03	05	08	01	10	02	09
Rr	12	08	05	02	04	06	11	13	01	07	03	10	09
Ir	13	11	04	12	06	05	01	02	08	03	10	07	09
IFC	13	04	11	05	01	09	12	02	10	06	08	03	07
Gc	12	04	05	10	02	11	13	08	01	06	03	07	09
Is	04	10	09	02	12	03	13	05	01	11	08	06	07

Na sequência, os valores para o Índice de Rugosidade (Ir) obtidos na pesquisa estão entre 1.142,94 e 3.418,74. Chen e Yu (2011) relacionam esse dado com o potencial erosivo de uma bacia, pois está diretamente ligado à geração de suprimentos para uma possível corrida de detritos. Posto isto, os maiores valores de Ir estão ligados às maiores potencialidades para a geração de corridas de detritos. As sub-bacias definidas como 09, 07, 10, 03 e 08 possuem as potencialidades mais baixas; já as de números 07, 01 e 13, potenciais médios; e por fim, as numeradas como 04, 11 e 13, altos potenciais.

O próximo valor analisado é o Índice de Força do Canal (IFC), onde obtiveram-se valores entre 2,06 e 57,60. Este índice é relevante, pois representa uma forma de mensurar os fatores erosivos de uma bacia de acordo com a área da mesma e a declividade em graus do seu canal principal (Conforti et al., 2011). Assim, quanto maior o valor obtido, maior será o potencial para geração de corridas de detritos. As sub-bacias classificadas com potencial baixo são as de números 07, 03, 08, 06, 10 e 02; as de médio potencial são as numeradas como 12, 09, 01 e 05; e, por fim, as de alto potenciais são as de números 11, 04 e 13.

Em relação ao índice Gradiente do Canal (Gc), os valores encontrados foram entre 205,35 e 482,88 m/km. Esse parâmetro evidencia as sub-bacias que possuem maior potencialidade em abastecer áreas-fontes para um possível evento de corrida de detritos, uma vez que este índice possibilita o reconhecimento de locais onde podem se depositar os sedimentos que serão mobilizados em eventos futuros. Desta forma, quanto maior o Gc, maior será o potencial para geração de corridas de detritos. Para este caso, as sub-bacias 09, 07, 03, 06 e 01 caracterizaram-se com as de menores potenciais. Não obstante, as sub-bacias 08, 13, 11, 02, 10, 05 e 04 possuem médios potenciais, e a número 12 apresenta alto potencial à ocorrência de corridas de detritos.

Por fim, para o Índice de Sinuosidade (Is) foram obtidos valores entre 1,03 e 1,63. O resultado desse cálculo expressa que quanto maior for o número, maior será a sinuosidade do canal e menor a velocidade do fluxo, ou seja, a velocidade de escoamento é menor (IPT, 2014). Isto posto, os números podem ser interpretados, segundo a analogia, que quanto menor for o índice de sinuosidade, maior a potencialidade para a ocorrência de corridas de detritos, pois a velocidade de escoamento dos materiais é maior devido à baixa sinuosidade do canal. Com isso, tem-se que a sub-bacia 07 é a de mais baixo potencial; em seguida, tem-se que as de números 06 e 08 são de médio potencial; e para finalizar, as sub-bacias com altos potenciais para geração de corridas de detritos são as numeradas como 11, 01, 05, 13, 03, 12, 02, 09, 10 e 04.

### **Análise integrada dos índices morfométricos**

Para definição final da ordem hierárquica das sub-bacias analisadas, foram atribuídos pesos iguais para todos os

índices morfométricos analisados. Sendo assim, conforme a Tabela 4, tem-se que as sub-bacias 04 e 11 são as que apresentam maiores potenciais para geração de corridas de detritos, uma vez que elas apresentam valores críticos (alto potencial) em quatro dos seis índices analisados, e os dois restantes enquadram-se na categoria de médios potenciais.

Na sequência, têm-se as sub-bacias 12 e 13, as quais apresentam valores para altos potenciais que se enquadram em três dos índices analisados, sendo que os outros três estão na categoria de médio potencial. Depois, as sub-bacias 02 e 05 são as que apresentam dois resultados na categoria de alto potencial, dois na categoria de médio e dois na categoria de baixo potencial. Agora, a sub-bacia 01 possui apenas um dos índices na categoria crítica de alto potencial para geração de corridas de detritos, sendo que outros três resultados estão classificados como médio e outros dois como baixo.

Na sequência, as sub-bacias 06 e 08 possuem um dos valores na categoria de alto potencial, dois resultados na de médio e três posicionados na classe de baixo potencial. Agora, as sub-bacias com menores potenciais para geração de corridas de detritos são as de números 09, 07 e 10, pois possuem um único índice classificado como alto potencial, um índice como médio e quatro dos índices como baixo potencial para geração de corridas de detritos.

A sub-bacia com mais baixo potencial para geração de corridas em relação a todas as analisadas é a de número 03, pois apresenta apenas um dos valores na classe de alto potencial, sendo o restante (outros cinco) classificado como baixo potencial. Com isso, pode-se dizer que a classificação hierárquica final é: 04 = 11 > 12 = 13 > 02 = 05 > 01 > 06 = 08 > 07 = 09 = 10 > 03.

### **CONCLUSÕES**

O presente trabalho mostrou que os índices morfométricos são importante ferramenta na avaliação da potencialidade para a geração de processos de corridas de detritos, principalmente em avaliações em escalas regionais, possibilitando resultados bastante coerentes com base no evento de fevereiro de 1994 em Cubatão (SP). Assim, o método pode ser aplicado em outros locais que possuam características geológicas e geomorfológicas semelhantes, associado às avaliações de detalhe em campo.

A sub-bacia 04, que engloba a Refinaria Presidente Bernardes — Cubatão, apresenta o maior potencial para geração de corridas de detritos. A sub-bacia 04 foi a mais atingida de toda a região, causando prejuízos estruturais e econômicos.

Em se tratando da aplicação desses cálculos em sub-bacias, pode-se dizer que para cada uma das bacias a importância de um ou outro índice morfométrico pode ser diferente, uma vez que as sub-bacias possuem suas particularidades individuais; entretanto, para este trabalho foram aplicados

pesos iguais para todos os índices analisados, por isso essas particularidades não foram consideradas. Também é necessário que a análise seja realizada de forma conjunta para que os processos possam ser melhor compreendidos.

Dada as características individuais de cada sub-bacia, os índices morfométricos possuem relevância fundamental para a identificação e monitoramento das áreas consideradas de alto potencial para gerar corridas de detritos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) pela bolsa concedida (Código de Financiamento 001). Agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 311962/2018-1) pela bolsa produtividade PQ-2 para Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

## REFERÊNCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2019). Time in a bottle: Challenges to disaster studies in Latin America and the Caribbean. *Disasters*, 43(Suppl. 1), S18-S27. <https://doi.org/10.1111/disa.12325>
- Almeida, F. F. M. (1958). O Planalto Paulistano. In: Azevedo, A. (Ed.), *A Cidade de São Paulo*. São Paulo: Companhia Editorial Nacional, v. 1, p. 113-167. Disponível em: <https://bdor.sibi.ufrj.br/bitstream/doc/454/1/GF%2014%20T01%20PDF%20-%20OCR%20-%20RED.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2023.
- Almeida, F. F. M. (1986). Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(4), 325-349. Disponível em: <https://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11927/11472>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- Almeida, F. F. M., Carneiro, C. D. R. (1998). Origem e Evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(2), 135-150.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (1977). Províncias estruturais brasileiras. In: VII Simpósio de Geologia do Nordeste. *Anais...*, p. 366-391. Campina Grande.
- Battisti, I. D. E., Battisti, G. (2008). *Métodos estatísticos*. Ijuí: Ed. Unijuí. (Coleção educação à distância. Série livro-texto.)
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 62-A, 23-27.
- Campanha, G. A. C., Sadowsky, G. R. (1999). Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiáí Domain). *Precambrian Research*, 98(1-2), 31-51. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(99\)00027-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(99)00027-3)
- Cerri, R. I., Reis, F. A. G. V., Gramani, M. F., Gabelini, B. M., Zaine, J. E., Sisto, F. P., Giordano, L. C. (2018). Análise da influência de atributos fisiográficos e morfométricos na definição da suscetibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de massa. *Geologia USP. Série Científica*, 18(1), 35-50. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-133737>
- Chen, C. Y., Yu, F. C. (2011). Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology*, 129(3-4), 387-397. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.002>
- Christofolletti, A. (1982). *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Conforti, M., Aucelli, P. P. C., Robustelli, G., Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazard*, 56, 881-898. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9598-2>
- Corrêa, C. V. S., Reis, F. A. G. V., Carmo Giordano, L., Cabral, V. C., Gramani, M. F., Gabelini, B. M., Veloso, V. Q. (2021). Assessment of the potentiality to the debris-flow occurrence from physiographic and morphometrics parameters: a case study in Santo Antônio Basin (Caraguatatuba, São Paulo State, Brazil). *Anuário do Instituto de Geociências*, 44, 43313. [https://doi.org/10.11137/1982-3908\\_2021\\_44\\_43313](https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_43313)
- EMPLASA—Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A. (2011). *Projeto Mapeia São Paulo*. Ortofotos 2011. Escala 1:10.000. São Paulo: EMLASA.
- Gramani, M. F. (2001). *Caracterização geológica-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica – USP.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth Science Reviews*, 112(1-2), 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Hajam, R. A., Hamid, A., Bhat, S. (2013). Application of morphometric analysis for geo hydrological studies using geo-spatial technology: A case study of Vishav drainage basin. *Hydrology Current Research*, 4(3), 1000157. <https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000157>

- Hasui, Y. (2012). Sistema Orogênico Mantiqueira. In: Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., Almeida, F. F. M., Bartoreli, A. (Eds.) *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca-Ball, p. 331-371.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society America Bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDO SAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDO SAT]2.0.CO;2)
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1986). *Programa Serra do Mar – levantamentos básicos nas folhas de Santos e Riacho Grande, Estado de São Paulo*. Anexo A – Estudos geológicos e geomorfológicos. Relatório 23.394. São Paulo: IPT, v. 2.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1987). Estudos das instabilizações de encosta da Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno “corrida de lama” e da prevenção dos seus efeitos. Relatório 26.258. São Paulo: IPT, v. 1.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2014). *Cartas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundações: 1:25.000*. Nota explicativa. São Paulo: IPT, 3016 p.
- Jakob, M. (1996). *Morphometric and geotechnical controls of debris flow: frequency and magnitude in southern British Columbia*. Tese (Doutorado). Vancouver: Departamento de Geografia, Universidade de Columbia Britânica.
- Kanji, M. A., Cruz, P. T., Massad, F. (2008). Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. *Landslides*, 5, 71-82. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0110-3>
- Kanji, M. A., Cruz, P. T., Massad, F., Araujo-Filho, H. A. (1997). Basic and Common Characteristics of Debris Flows. In: An American Symposium on Landslides, 2., 1997. Anais..., p. 223-231. Rio de Janeiro: COBRAE.
- Kanji, M. A., Massad, F., Cruz, P. T. (2003). Debris flows in areas of residual soils: occurrence and characteristics. In: International Workshop on Occurrence and Mechanism of Flows in Natural Slopes and Earthfills, 2. Anais..., p. 1-11. Sorrento: Associazione Geotecnica Italiana.
- Lima, I. F., Fernandes, N. F., Vargas Junior, E. D. A. (2020). Análise morfométrica em bacias afetadas por fluxos de detritos na Região Serrana do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(2), 399-419. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1515>
- Loch, C. (1984). *A interpretação de imagens aéreas: noções básicas e algumas aplicações nos campos profissionais*. Florianópolis: Editora da UFSC. (Série Didática.)
- Lopes, E. S. S. (2006). *Modelagem especial dinâmica em Sistema de Informação Geográfica: Uma aplicação ao estudo de movimentos de massa em uma Região da Serra do Mar Paulista*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Unesp.
- Lopes, E. S. S., Riedel, P. S., Bentz, C. M., Ferreira, M. V., Naletto, J. L. C. (2007). Inventário de escorregamentos naturais em banco de dados geográfico – análise dos fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão – SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007. Anais..., p. 2785-2796.
- Massad, F., Cruz, P. T., Kanji, M. A. (2009). “Debris flows” em Cubatão – SP: danos em instalação industrial e em barragens-gabião. In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 5., 2009. Anais..., p. 1-8. São Paulo: ABMS Núcleo Regional São Paulo.
- Nery, T. D. (2016). *Dinâmica das corridas de detritos no Litoral Norte de São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – USP. <https://doi.org/10.11606/T.8.2016.tde-08032016-165052>
- Ponçano, W. L., Carneiro, C. D. R., Bistrichi, C. A., Almeida, F. F. M., Prandini, F. L. (1981). *Notícia Explicativa do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT. (Monografias.)
- Ribeiro, M. C. S., Hackspacker, P. C., Ribeiro, L. F. B., Hadler Neto, J. C. (2011). Evolução tectônica e denudacional da Serra do Mar (SE/Brasil) no limite entre o Cretáceo Superior e o Paleoceno, utilizando análises de traços de fissão e U-TH/HE em apatitas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 12(3), 3-14. <https://doi.org/10.20502/rbg.v12i0.254>
- Sadowsky, G. R. (1991). A megafalha de Cubatão no sudeste brasileiro. *Boletim IG-USP. Série Científica*, 22, 15-28. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v22i0p15-28>
- Santos, A. R., Silva, S. G., Nough, J. R. (2009). Serra do Mar: Características Geológicas e Geotécnicas e Importância Estratégica. Os Bairros Cota. *Programa de Recuperação Socioambiental da Serra do Mar*, 16 p.
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *GSA Bulletin*, 67(5), 597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Sestini, M. F., Florenzano, T. G. (2014). Caracterização de cicatrizes de deslizamentos por processamento de dados TM Landsat em Caraguatatuba-SP. *Geologia USP. Série Científica*, 4(2), 57-69. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2004000200005>

Sidle, R. C., Pearce, A. J., O'Loughlin, C. L. (1985). *Hillslope stability and land use*. Washington, D.C.: American Geophysical Union. (Water Resources Monograph Series, v. 11.)

Starkel, L. (1979). The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief. *Geographia Polonica*, 41, 13-20.

Strahler, A. N. (1958). Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. *GSA Bulletin*, 69(3), 279-300. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1958\)69\[279:DAATF E\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1958)69[279:DAATF E]2.0.CO;2)

Takahashi, T. (1981). Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. *Journal of Natural Disaster Science*, 3(1), 57-89.

Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1, 61-66. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>

Yildiz, O. (2004). An investigation of the effect of drainage density on hydrologic response. *Turkish Journal of Engineering and Environment Sciences*, 28(2), 85-94.