

## PARÂMETROS GEOMORFOLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO PÓS-DESASTRE DE ESCORREGAMENTOS: ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MASCARADA/RS

Franciele Zanandrea <sup>1\*</sup>; Gabriel Lopes Cardozo <sup>2</sup>; Gean Paulo Michel <sup>3</sup> & Masato Kobiyama <sup>3</sup>

**ABSTRACT** – Extreme events, such as mass movements, modify hydrosedimentological processes in watersheds. An initial sediment load is generated at the time of slope failure, and additional sediment is generated through superficial erosion generated from rainfall affecting the landslides scars. The mapping, characterization and evaluation of extreme hydrosedimentological events and especially of landslide scars are important procedures for the management of watersheds. The present paper proposes a set of geomorphological parameters for the characterization of landslides scars. From the geomorphologic variables, the following parameters were calculated: percentage of affected area (PAA), the drainage density of scars (Ddc), and the density of scars (Dcic) for different areas of evaluation. It was also calculated the mean slope and curvature of the landslides scars and the order of the rivers for which they flow. The present methodology was tested in the watershed of the Mascarada River. Approximately 407 landslide and debris flow scars were mapped, totalizing an affected area of approximately 2.2 km<sup>2</sup>. The scar density and drainage values were relatively high, demonstrating the magnitude of the event. Most of the landslides have a mean slope between 25° and 35° and approximately 66% of the landslides occurred in convergent areas. All landslides scars started in zero order drainage, of which 27.9% did not reach a drainage of higher order. The evaluation of the event through an influence area concept represented the magnitude of the event in a better way when compared with the use of a sub-basin concept. Thus, through the geomorphological description of the event it was possible to better understand the post-disaster watersheds hydrosedimentological behavior.

**Palavras-Chave** – Desastres Naturais; Cicatrizes de Escorregamento.

---

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – IPH/UFRGS

<sup>2</sup> Graduação em Engenharia Ambiental – IPH/UFRGS

<sup>3</sup> Professor – IPH/UFRGS

\* franciele.zanan@gmail.com

## INTRODUÇÃO

Eventos extremos alteram os processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas. Korup; Mcsvaney & Davies (2004) relatam que os escorregamentos são responsáveis pela maior parte de fontes de sedimentos para os sistemas fluviais. Em encostas declivosas, os movimentos de massa, os quais são considerados um tipo de evento extremo, estão entre os principais processos erosivos (BURTON; BATHRUST, 1998). Esses, além de mobilizarem um elevado volume de sedimentos que provavelmente alcançará a rede fluvial, afetam as taxas de produção de sedimentos da bacia em uma larga escala temporal (KORUP, MCSAVENEY, DAVIES, 2004; MIKOŠ, FAZARINC, RIBICIC, 2006).

Petley (2012), através da análise de 2.620 movimentos de massa fatais não-sísmicos ao redor do mundo, mostra que estes fenômenos estão fortemente relacionados com o relevo e com a incidência de chuva da região. No Brasil, os movimentos de massa estão intimamente relacionados com estações chuvosas (FRANK & SEVEGNANI, 2009; AVELAR et al., 2011; COELHO NETTO et al., 2011), bem como, conseqüentemente, à produção de sedimentos da bacia hidrográfica.

A carga inicial de sedimentos é gerada no momento da falha da encosta, e o sedimento adicional é gerado a partir das chuvas que afetem as cicatrizes. Os processos de destacamento da partícula de sedimento em encostas degradadas, como por exemplo com cicatrizes de escorregamentos, podem fornecer sedimentos para os canais com maior rapidez do que eram transportados anteriormente (MORRIS; FAN, 1998), em eventos chuvosos. Essa condição pode aumentar a frequência e magnitude de eventos de produção de sedimentos em suspensão por até vários anos se as cicatrizes de escorregamentos e caminhos do fluxo permanecerem sem vegetação (HICKS; GOMEZ; TRUSTRUM, 2000).

O mapeamento, a caracterização e a avaliação dos eventos hidrossedimentológicos extremos e principalmente das cicatrizes de escorregamentos são procedimentos importantes no gerenciamento de bacias hidrográficas, mesmo depois da ocorrência dos desastres. Segundo Smyth & Royle (2000) diagnósticos são de extrema importância para prevenção dos desastres naturais, servindo como base para a gestão de risco.

Para caracterizar os movimentos de massa de maneira equiparável entre diferentes eventos existe a necessidade da criação de parâmetros que sirvam para a avaliação pós-desastre. Assim, o presente trabalho propõe um conjunto de parâmetros geomorfológicos para caracterização das cicatrizes de escorregamento, com o intuito de contribuir ao entendimento da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica após a ocorrência do desastre. A presente metodologia será testada na bacia hidrográfica do rio Mascarada, uma das cabeceiras do rio dos Sinos, localizada no estado do Rio Grande do Sul.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho compreende a bacia hidrográfica do rio Mascarada, que possui uma área de aproximadamente 320 km<sup>2</sup>, situada entre os municípios de São Francisco de Paula, Riozinho e Rolante, no estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). As cabeceiras possuem

vales e encostas escarpadas, encontrando planícies mais extensas nas áreas de jusante. As altitudes na bacia variam de 61 a 997 m, com encostas declivosas (até 65°) e solos com baixas profundidades. A bacia está localizada na parte alta da Serra do Nordeste, onde ocorre a maior incidência de precipitação no estado, atingindo valores superiores a 2000 mm anuais (GPDEN/SEMA, 2017). O rio principal possui seções transversais muito encaixadas com declividade média de aproximadamente 37%. A região encontra-se em uma unidade com características de transição entre o Planalto de Cima da Serra e a Planície Costeira do Rio Grande do Sul que possui naturalmente uma condição de instabilidade geomorfológica, o que a torna susceptível a movimentos de massa (DANTAS; VIERO; SILVA, 2010).

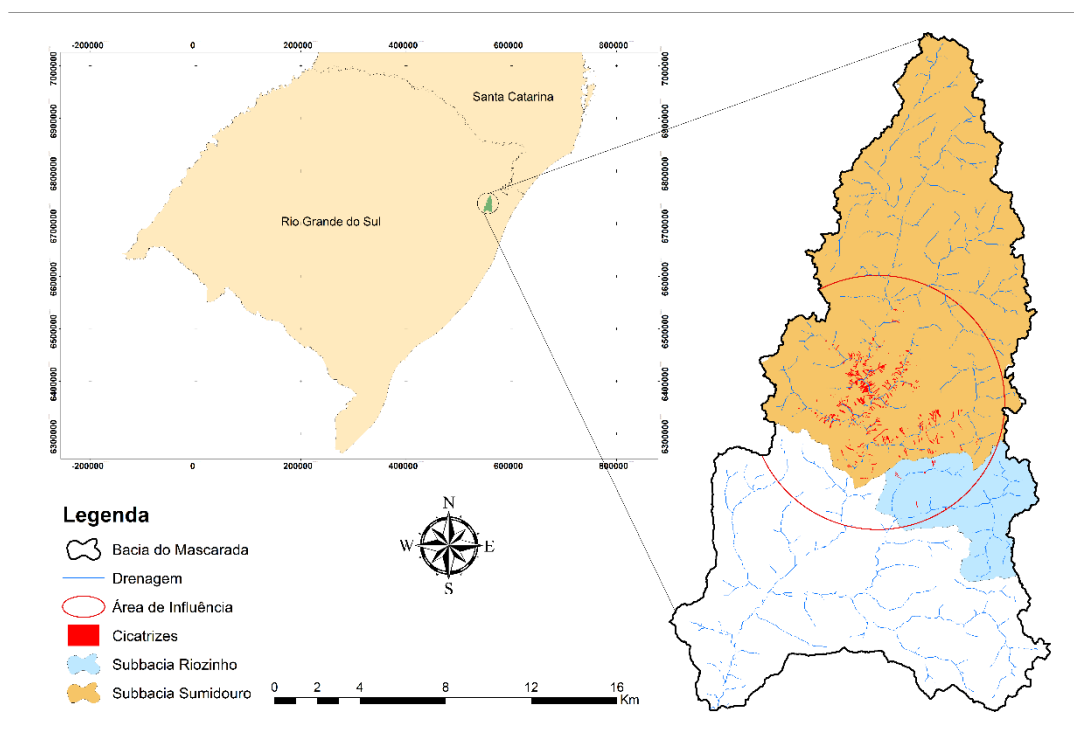


Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Mascarada, sub-bacias e área de influência.

## Descrição do evento

A bacia do rio Mascarada foi atingida por um forte evento pluviométrico no dia 05 de janeiro de 2017, o qual deflagrou uma grande quantidade de movimentos de massa apenas na porção com maior declividade. Essas chuvas ocorreram de forma concentrada próxima às cabeceiras da bacia, porém seus efeitos foram sentidos nos municípios de jusante, como Rolante, que foi atingido por uma inundação com alta concentração de sedimentos. Esse evento afetou mais de 6,6 mil pessoas, e 70% do território do município de Rolante, felizmente não incorrendo em óbitos, segundo a prefeitura do município. As chuvas registradas por pluviômetros localizados próximos ao local indicaram volumes variando entre 100 e 180 mm em poucas horas, sendo que a média mensal de janeiro oscila em torno de 180 mm acumulados (GPDEN/SEMA, 2017).

## Métodos

As análises foram realizadas a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) oferecido pela *Alaska Satellite Facility* com 12,5 m de resolução. Para avaliação das cicatrizes a área de estudo foi dividida em 2 sub-bacias principais, denominadas Sumidouro e Riozinho, de acordo com os dois principais rios que compõem a bacia do rio Mascarada (Figura 1). Os exutórios foram definidos logo após a presença da última cicatriz que não alcançou a drenagem ou o ponto de confluência da drenagem onde a cicatriz chegou com o rio principal da sub-bacia.

As cicatrizes também foram avaliadas de acordo com uma área total de influência na bacia do Mascarada, denominada “área de influência”. Esta área foi estabelecida criando um círculo a partir do centro geométrico/massa das cicatrizes, assim, a distância entre esse ponto e o vértice mais longínquo das cicatrizes estabelece o raio do círculo. Este círculo teve seus limites definidos dentro da bacia hidrográfica do rio Mascarada, delimitando então a chamada “área de influência”.

A partir de imagens do satélite Sentinel-2 com resolução de 10 m (*European Space Agency – ESA, 2015*) do dia 15/01/2017 foram levantadas as cicatrizes dos escorregamentos ocorridos no dia 05/01/2017. Os escorregamentos foram delimitados com o uso de geoprocessamento e não foram distinguidas áreas de ruptura, transporte e deposição de cada escorregamento, sendo apenas excluídas as áreas de transporte de sedimento pelo rio. As áreas das cicatrizes foram calculadas através de geoprocessamento.

O comprimento das cicatrizes foi determinado de maneira semelhante ao usado por Roback et al. (2018). Como as cicatrizes possuem formato alongado, delgado e retilíneos, aproxima-se ao comprimento pelo lado equivalente dos polígonos que as cicatrizes geram (ROBACK et al., 2018). Porém como as formas nas cicatrizes da bacia do rio Mascarada não são retilíneas, ou seja, apresentam sinuosidades, o uso desse método subestimaria o comprimento. Assim, para compensar tal fato, adotou-se como comprimento da cicatriz a metade do perímetro do polígono que delimita a cicatriz, visto que, dessa forma, as sinuosidades das cicatrizes são consideradas.

As declividades e a curvatura das encostas foram geradas a partir do MDT com o uso do software ArcGis. Estes dados foram cruzados com a área das cicatrizes, obtendo então a declividade e a curvatura das áreas onde ocorreram os escorregamentos. Para essa análise foram consideradas apenas as áreas dos escorregamentos, ou seja, quando dois escorregamentos seguem o mesmo caminho esses passam a ser considerados fluxo de detritos. Também foram classificadas as drenagens da bacia de acordo com a ordem de Strahler (1957) e Tsukamoto & Minematsu (1987). Assim, avaliou-se a ordem da drenagem onde iniciaram e onde chegaram as cicatrizes de escorregamento.

A partir das variáveis geradas foram calculados os seguintes parâmetros: a porcentagem de área atingida ( $PAA$ ), a densidade de drenagem de cicatrizes ( $Dd_c$ ), e a densidade de cicatrizes ( $D_{cic}$ ):

$$PAA = \frac{\sum A_{cic}}{A_{sub}} * 100, \quad Dd_c = \frac{\sum L_{cic}}{A_{sub}}, \quad D_{cic} = \frac{\sum N_{cic}}{A_{sub}} \quad (1), (2), (3)$$

onde  $A_{cic}$  é a área atingida pelas cicatrizes;  $A_{sub}$  é a área total da sub-bacia;  $L_{cic}$  é o comprimento das cicatrizes em km; e  $N_{cic}$  é o número de cicatrizes. O mesmo foi calculado em relação a área de influência ( $A_{inf}$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram mapeadas aproximadamente 407 cicatrizes de escorregamentos e fluxo de detritos, totalizando uma área diretamente afetada de aproximadamente 2,2 km<sup>2</sup>. As cicatrizes apresentam solo e rocha exposta conforme as imagens de satélite, sendo potenciais fontes de sedimentos ao canal.

Observa-se que a área afetada diretamente pelos escorregamentos é representada aproximadamente 0,7% da área da bacia do Rio Mascarada, porém, como o evento ocasionou diversos fluxos de detritos e uma grande inundação com alta concentração de sedimentos, a área afetada indiretamente se expande pela quase totalidade da bacia (Tabela 1). Já os valores de densidade de cicatrizes foram relativamente altos quando representados pela área de influência, que contempla todos os escorregamentos que ocorreram na bacia. Esse valor demonstra a magnitude do evento e indica uma grande alteração geomorfológica da paisagem. A sub-bacia do sumidouro e a área de influência apresentaram os maiores valores de densidade de drenagem de cicatrizes, que se comparados aos valores de densidade de drenagem usual de bacias hidrográficas (GREGORY E WALLING, 1968), seria considerado como drenagem regular, o que para escorregamentos de terra demonstra a grande magnitude do evento.

A sub-bacia do Sumidouro apresentou os maiores valores dos parâmetros calculados quando comparadas as outras bacias, pois é nela onde se concentram a maior parte dos escorregamentos. Porém os maiores valores obtidos foram para a análise em relação a área de influência, pois como a avaliação a partir de áreas de bacias considera as regiões a montante dos escorregamentos acaba-se subestimando os parâmetros, pois áreas não afetadas são consideradas nas análises.

Tabela 1. A porcentagem de área atingida (PAA), a densidade de drenagem de cicatrizes (D<sub>dc</sub>), e a densidade de cicatrizes (D<sub>cic</sub>) para as áreas de avaliação.

Área de avaliação	PAA (%)	D <sub>cic</sub> (Nº/km <sup>2</sup> )	D <sub>dc</sub> (km/km <sup>2</sup> )
Bacia Mascarada	0,7	1,28	0,25
Sub-bacia Sumidouro	1,4	2,48	0,48
Sub-bacia Riozinho	0,2	0,44	0,08
Área de influência	2,0	3,67	0,71

Grande parte dos escorregamentos possuem uma declividade média entre 25° e 35° (Tabela 2). Apenas 6,6% dos escorregamentos ocorreram nas áreas de maior declividade. Porém todos os escorregamentos se encontram totalmente em áreas consideradas declivosas o que facilita sua chegada ao canal (Figura 2).



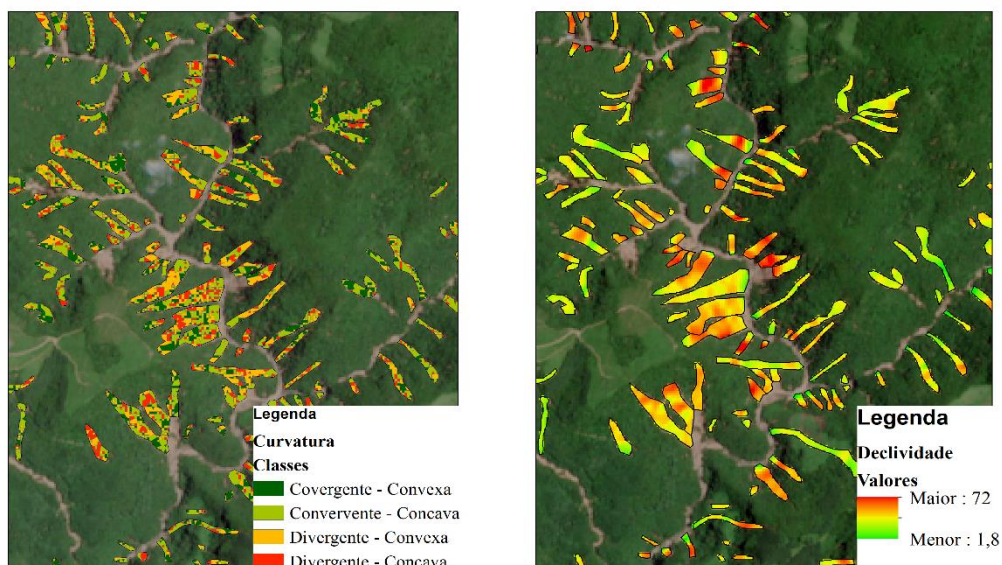


Figura 2. Mapa da curvatura e declividade em graus das cicatrizes de escorregamentos.

Tabela 2. Declividade das cicatrizes dos escorregamentos.

Classe de declividade (graus)	Número de cicatrizes	%
15-25	36	9,9%
25-35	200	55,3%
35-45	102	28,2%
45-65	24	6,6%

Outro fator que facilitou a chegada dos escorregamentos ao canal foi a curvatura convergente dos locais dos escorregamentos. Conforme a Tabela 3 aproximadamente 66% dos escorregamentos ocorreram em áreas convergente, em que desses 83% foram em áreas côncavas. Esses resultados corroboram a teoria de deflagração de escorregamentos translacionais rasos a partir da convergência do escoamento (DIETRICH E MONTGOMERY, 1998).

Tabela 3. Classes de curvatura das cicatrizes dos escorregamentos.

Classe de curvatura	Número de cicatrizes	%
Convergente-Côncava	199	55,0%
Convergente-Convexa	41	11,3%
Convergente-Retilínea	0	0%
Planar-Côncava	0	0%
Planar-Convexa	0	0%
Planar-Retilínea	0	0%
Divergente-Côncava	81	22,4%
Divergente-Convexa	41	11,3%
Divergente-Retilínea	0	0%

Em relação ao ordenamento de Strahler (1957) e Tsukamoto & Minematsu (1987), todas as cicatrizes iniciaram em drenagens de ordem zero, sendo que dessas 27,9% não chegaram a uma drenagem de maior ordenamento, ou seja, não estão conectadas ao canal. Os escorregamentos que se conectaram com o canal alcançaram drenagens de ordem 1 e 5 principalmente, representando 21,8% cada (Tabela 4).

Tabela 4. Ordenamento de Strahler (1957) dos rios onde chegaram os escorregamentos.

Ordem do rio onde chegou o escorregamento	Nº de escorregamentos	%
0	101	27,9
1	79	21,8
2	34	9,4
3	69	19,1
4	0	0
5	79	21,8
6	0	0

De acordo com a Tabela 4, 72,1% dos escorregamentos alcançaram o canal, ou seja, estão conectados ao canal, o que demonstra forte influência dos escorregamentos de terra na produção de sedimentos da bacia a jusante. Assim, existe alta probabilidade de que a produção de sedimentos na bacia tenha aumentado significativamente após a ocorrência dos referidos movimentos de massa.

## CONCLUSÕES

A partir da importância da caracterização de eventos hidrossedimentológicos extremos e da magnitude do evento ocorrido na bacia do rio Mascarada, o presente artigo teve como objetivo a determinação de um conjunto de parâmetros geomorfológicos para caracterização das cicatrizes de escorregamento e a avaliação do evento ocorrido. Assim, a finalidade foi contribuir ao entendimento da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica após a ocorrência do desastre.

A avaliação do evento a partir de uma área de influência, representada por um círculo com centro coincidente com o centro geométrico/massa do conjunto de escorregamentos, representa melhor a magnitude do evento através dos valores dos parâmetros, pois não inclui em sua análise áreas situadas a montante e a jusante na bacia que não foram afetadas, como é comum em avaliações a partir das sub-bacias.

As cicatrizes dos escorregamentos modificaram a paisagem da bacia hidrográfica e, conseqüentemente, sua dinâmica hidrossedimentológica. Esse evento ocasionou também fortes modificações na morfologia do rio principal, além das vertentes. A avaliação da declividade, curvatura e ordem da drenagem onde chegou cada um dos escorregamentos também possibilitam a avaliação da conectividade dos escorregamentos com canal, o que influencia diretamente no aporte de sedimentos ao mesmo. Assim, através da caracterização do evento ocorrido é possível

aprofundar o entendimento do comportamento hidrossedimentológico da bacia hidrográfica após o evento, bem como também fornecer subsídios para a gestão dos desastres naturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURTON, A.; BATHURST, J. C. (1998). *“Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale. Environmental Geology”*, v.35, p.89-99.

COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; VIANNA, L. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P. (2011). *“The extreme landslide disaster in Brazil”*, in Proceedings of the Second World Landslide Forum, ed. Springer-Verlag, Rome/IT, pp.3-7.

DANTAS, M. E.; VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A. (2010). *“Origem das Paisagens”*, in Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Org. por Vieiro, A. C. & Silva, D. R. A. ed. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Porto Alegre/BR, pp. 35-50.

FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (2009). *Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. Água, gente e política*. Blumenau/SC, 192p.

GPDEN/SEMA- RIO GRANDE DO SUL. (2017). *Diagnóstico preliminar*. Porto Alegre: DRH/SEMA, 2017. 26p. Disponível em: <[http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico\\_preliminar\\_gt\\_rolante\\_revfinal.pdf](http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico_preliminar_gt_rolante_revfinal.pdf)>. Acesso em: 07 mai. 2018.

GREGORY, K.J.; WALLING, D.E. (1968) *“The Variation Of Drainage Density Within A Catchment”*, Hydrological Sciences Journal, v.13, p.61-68.

HICKS, D. M., GOMEZ, B., TRUSTRUM, N. A. (2000). *“Erosion thresholds and suspended sediment yields: Waipaoa River Basin”*, Water Resources Research, v.36, p.1129–1142.

KORUP, O.; MCSAVENEY, M. J.; DAVIES, T. R. (2004). *“Sediment generation and delivery from large historic landslides in the Southern Alps”*. Geomorphology, v.61, p.189-207.

MIKOŠ, M.; FAZARINC, R.; RIBICIC, M. (2006). *“Sediment production and delivery from recent large landslides and earthquake-induced rock falls in the Upper Soca River Valley”*. Engineering Geology, v.86, p.198-210.

MORRIS, G. L.; FAN, J. (1998) *Reservoir Sedimentation*. McGraw-Hill Book Co., New York.

PETLEY, D.N. (2012). *“Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding”*, in Landslides and engineered slopes, Org. por Eberhardt, E.; Froese, C.; Turner, A.K.; Leroueil, S., ed. CRC Press, London/UK, pp. 3-13.

SMYTH, C. G.; ROYLE, S. A. (2000). *“Urban landslide hazards: incidence and causative factors in Niterói, Rio de Janeiro State, Brazil”*. Applied Geography, v.20, p.95-117.

STRAHLER, A. N. (1957). *“Quantitative analysis of watershed geomorphology”*. Trans. Am. Geophys. Union, v.38, p.913-920.

TSUKAMOTO, Y; MINEMATSU, H. (1987). *“Hydrogeomorphological characteristics of a zero-order basin”*. Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, v.165, p.61–70.