

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

BARRAMENTO DE VALES POR ESCORREGAMENTOS: UMA ANÁLISE DE PARÂMETROS GEOMORFOMÉTRICOS

Leonardo Rodolfo Paul¹ ; Mel Oliveira Guirro²; Gean Paulo Michel³

RESUMO – Barragens originadas por movimentos de massa são formações naturais causadas pelo deslocamento de grandes volumes de solo e/ou rochas que obstruem a seção de um rio, causando acúmulo de água à montante e, caso rompam, geram inundações bruscas à jusante. A avaliação de áreas suscetíveis a barragens naturais é essencial para a gestão de risco. Para facilitar a complexa análise desse fenômeno, índices geomorfológicos podem ser aplicados para identificar zonas de interesse. Nesse sentido, esse estudo aplica os índices *Blockage Index* (BI) e *Morphological Obstruction Index* (MOI) para avaliar a formação e estabilidade de barragens naturais. Além disso, é analisada a relação entre o ângulo de abertura do vale, o ângulo de entrada do escorregamento e a área do escorregamento com a incidência de bloqueios a fim de sugerir o Índice de Susceptibilidade do Vale (ISV). Descobriu-se que os limiares do índice BI não foram adequados para a área de estudo, enquanto que os do índice MOI foram. Não foram encontradas correlações relevantes entre a área do escorregamento com o ângulo de abertura do vale. Foram estabelecidos limiares superiores e inferiores para o ISV, sendo os valores de 6,88 e 5,57 respectivamente. Todos os escorregamentos que não formaram barragens ficaram abaixo do limiar superior. O ISV pode ser útil para avaliação preliminar, entretanto requer validação adicional.

ABSTRACT– Landslide dams are natural formations originated from the movement of huge soil or rock volumes, which blocks a river section, causing upstream water impoundment and, if they fail, generate downstream flash floods. The assessment of landslide dam prone areas is essential for risk management. To facilitate the complex analysis of this phenomenon, geomorphometric indices can be applied to identify areas of interest. On that basis, this study applies the Indexes Blockage Index (BI) and Morphological Obstruction Index (MOI) to assess the formation and stability of natural dams. In addition, the relation between landslide area, valley opening angle and landslide intrusion angle with the incidence of landslide dams are analyzed in order to propose the Valley Susceptibility Index (VSI). It was found that the BI index thresholds were not adequate for the study area, while the MOI index was adequate. Relevant correlation between landslide area and valley opening were not found. Upper and lower threshold curves were made using VSI values of 6.88 and 5.57 respectively. All non-damming landslides stood below the upper threshold curve. VSI might be used for preliminary assessment of dam-forming landslide susceptibility but require further validation.

Palavras-Chave – Barramento natural; escorregamentos; índice geomorfológico.

1) IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, leonardorpaul@gmail.com, (47) 98881 6320

2) IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, mel.guirro@gmail.com, (51) 98100 1334

3) IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, gean.michel@ufrgs.br, (51) 3308 6414

INTRODUÇÃO

Os escorregamentos são processos naturais da evolução da paisagem. Eles podem ocorrer repentinamente, evoluir para um fluxo de detritos e aumentar sua área de efeito, afetando severamente comunidades próximas. Em algumas ocasiões os escorregamentos podem alcançar os rios e provocar uma obstrução. Este fenômeno pode ser chamado de barramento por escorregamento ou barragem natural.

O bloqueio provocado por um escorregamento pode gerar, principalmente, duas consequências, uma causada pela formação da barragem e outra pelo seu rompimento. No primeiro caso, o nível da água à montante do barramento irá aumentar, inundando as áreas próximas. A magnitude da inundação irá depender das características do barramento, como a altura da barreira e a sua resistência à ruptura por *piping* ou *breaching* (COSTA; SCHUSTER, 1988). No segundo caso, quando um barramento falha um grande volume de água será descarregado abruptamente, propagando altas vazões para a jusante, as quais podem causar inundações bruscas (CLAGUE; EVANS, 1994; KORUP, 2004; CHEN *et al.*, 2011).

As investigações iniciais sobre barragens naturais possuem uma abordagem mais qualitativa acerca das causas e consequências de sua formação e ruptura (ADAMS, 1981; COSTA; SCHUSTER, 1988; CLAGUE; EVANS, 1994). Em seguida, os esforços foram direcionados para a compreensão da evolução e da estabilidade de barramentos já formados (WALDER; O'CONNOR, 1997; ERMINI; CASAGLI, 2003; KORUP, 2004). Recentemente, com o advento dos sistemas de informação geográficas e o aumento da potência computacional, alguns autores propõem metodologias baseadas em simulação numérica para avaliar as áreas propensas a barragens naturais (SASSO *et al.*, 2015, BRAUN *et al.*, 2018). Apesar dessas metodologias recentes apresentarem bons resultados, aplicá-las a nível de bacia pode ser difícil e dispendioso. Por conta disso, alguns estudos buscaram desenvolver índices de simples aplicação (OTHMAN; GLOGLUEN, 2013; CHEN; CHANG, 2016; STEFANELLI *et al.*, 2016), que podem ser utilizados para uma avaliação preliminar das áreas suscetíveis ao bloqueio por escorregamento.

Costa e Schuster (1988) ressaltam que a maior parte das barragens naturais formadas por escorregamentos ocorrem em vales estreitos e podem ser bloqueados com um volume de material menor, se comparado com vales mais abertos. Nesse sentido, este trabalho objetiva analisar a adequabilidade dos índices *Blockage Index* (BI), sugerido por Casagli e Ermini (1999), e o *Morphological Obstruction Index* (MOI), sugerido por Stefanelli *et al.* (2016) para uma área de estudo diferente da qual os índices foram originalmente desenvolvidos e propor um novo índice, analisando a relação entre a área do escorregamento, a qual dá uma noção do volume de material movimentado, e o ângulo de abertura do vale na incidência de barragens naturais.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo selecionada foi o estado de Taiwan, por possuir um grande registro de casos de barramento por escorregamento, permitindo realizar análises de correlação com uma amostra mais significativa. Taiwan é uma ilha próxima a costa sudeste da China e apresenta uma área de quase 36 mil km². Com uma cadeia de montanha central do norte ao sul que ocupa dois terços da ilha, o ponto mais alto é de quase 4 mil metros de altitude e apresenta altas declividades (KLOSE, 2006). O clima varia de tropical a temperado, sendo a precipitação média de todo o país de aproximadamente 2600 mm (KUO *et al.*, 2016).

Taiwan é um estado que passa por eventos extremos de precipitação, principalmente na forma de monções, e terremotos. Ambos os fenômenos são destrutivos por si só, mas também deflagram escorregamentos de grandes magnitudes. Por conta disso existem diversos registros de barramentos em um curto período de tempo (CHEN, 2011; CHEN; YU, 2011; CHEN; CHANG, 2016).

Esse estudo utilizou 23 casos de barramento, registrados entre 1999 e 2009, dos quais 20 foram causados por precipitações (monções e chuvas torrenciais) e os demais por terremotos (CHEN; CHANG, 2016). Também foram utilizados 18 escorregamentos que não causaram barramento, identificados por meio de análise visual de imagens presentes na plataforma Google Earth. A localização dos escorregamentos utilizados está apresentada na Figura 1.

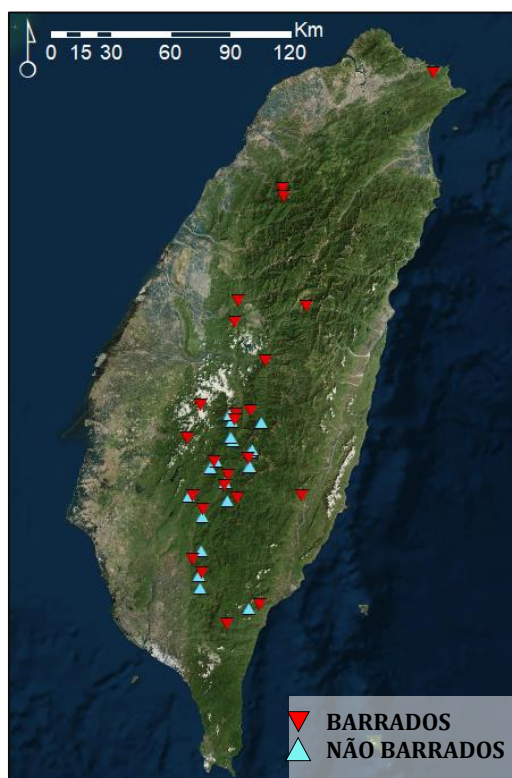


Figura 1. Distribuição dos escorregamentos utilizados na análise em Taiwan

Índices Geomorfométricos

Para a análise geomorfométrica da região, utilizou-se ferramentas do software ArcGIS 10.4. As informações de altimetria foram provenientes do Modelo Digital de Terreno (MDT) obtido pelo radar Palsar da missão ALOS, com restituição para a resolução de 12,5 m por pixel.

Inicialmente, dois índices geomorfométricos foram aplicados para os pontos onde foram registrados barramentos, a fim de avaliar a performance dos índices. Os índices utilizados foram o *Blockage Index* (BI), sugerido por Casagli e Ermini (1999), e o *Morphological Obstruction Index* (MOI), sugerido por Stefanelli *et al.* (2016). A Equação (1) e (2) descrevem esses índices, respectivamente.

$$BI = \log \left(\frac{V_d}{A_b} \right) \quad (1)$$

onde V_d é o volume de solo da barragem (m^3); e A_b é a área da bacia hidrográfica a montante da barragem (km^2).

$$MOI = \log \left(\frac{V_l}{W_v} \right) \quad (2)$$

onde V_l é o volume de solo transportado pelo escorregamento (m^3); e W_v é a largura do vale (m).

O parâmetro de área da bacia hidrográfica a montante foi definido com auxílio de SIG. Para determinar a largura do vale, foi verificada a distância horizontal em que o vale tinha 30 metros de altura, a partir do ponto barrado no rio. Esse valor foi escolhido pois observou-se que poucas barragens apresentavam mais de 30 metros.

Chen *et al.* (2014) sugeriram um método rápido de análise da geometria de barragens naturais, sendo criadas as Equações (3) e (4), que são equações empíricas, baseadas em barramentos naturais de Taiwan. Essas equações foram utilizadas a partir das áreas dos escorregamentos fornecidas por Chen e Chang (2016).

$$V_l = 0,316 \times A_L^{1,361} \quad (3)$$

$$V_d = 0,204 \times V_l^{0,917} \quad (4)$$

onde V_l é o volume do escorregamento (m^3); A_L é a área do escorregamento (m^2); e V_d é o volume da barragem (m^3).

A partir de uma análise de eventos, Casagli e Ermini (1999) determinaram que para $BI < 3$ não há formação de barragens e que para $BI > 5$ ocorre a formação de barragens. Similarmente, Stefanelli *et al.* (2016) determinou os limiares de que $MOI < 3$ indica que a barragem não se forma e que $MOI > 3.83$ ocorre a formação de barragem. Assim, foram avaliados se esses índices são adequados para os escorregamentos em Taiwan.

Após a aplicação de índices desenvolvidos por outros autores, foram analisados outros parâmetros que se relacionam com a formação da barragem. Para tal, inicialmente foram plotados gráficos que confrontavam a área do movimento de massa (A_L) com os ângulos de abertura do vale (θ), o ângulo de entrada do movimento de massa e área de contribuição à montante (A_C). Além disso, foram calculadas correlações de Pearson para as distribuições.

Para a avaliação do ângulo de abertura do vale (θ), foram analisados em ambiente SIG os perfis das seções transversais dos vales que foram bloqueados por escorregamentos. A partir do talvegue foram construídos dois vetores, um para cada uma das margens, direcionados para pontos que ficavam a uma determinada altura (y) em relação ao talvegue, conforme o esquema da Figura 2. Foram utilizadas alturas de 10, 15 e 20 m.

O ângulo de entrada do movimento de massa foi obtido a partir de um vetor com origem na cabeceira da cicatriz do movimento de massa, direcionado até o rio. Ângulos menores do que 90° indicam que o sentido do escoamento é contra corrente, maiores que 90° são a favor da corrente e próximos de 90° são perpendiculares ao rio. A área de contribuição (A_C) foi obtida utilizando o conjunto de ferramentas *ArcHydro*, para ArcGIS 10.5.

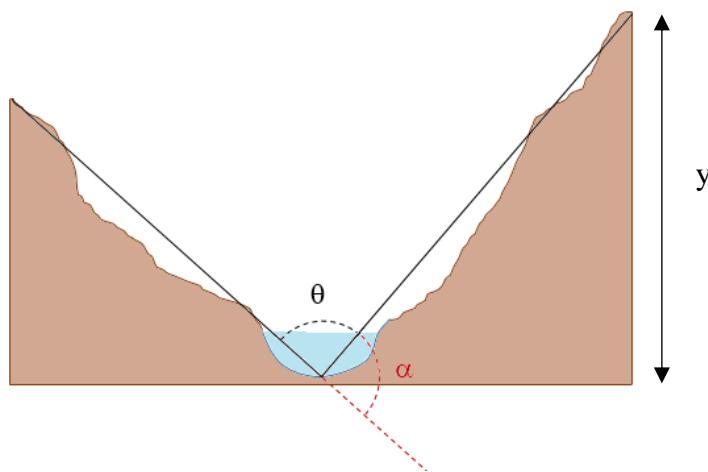


Figura 2. Esquema representando o ângulo de abertura (θ) e o ângulo suplementar de abertura do vale (α)

Por fim, foi sugerido um novo índice geomorfométrico que relaciona a área do escorregamento (A_L) com o ângulo suplementar de abertura do vale (α , conforme a Figura 2), de acordo com a Equação (5).

$$ISV = \log(A_L \cdot \alpha) \quad (5)$$

onde ISV é o Índice de Susceptibilidade do Vale.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da aplicação do índice BI para os escorregamentos que formaram barragens está exposto na Figura 3. O índice BI não representou bem as condições de Taiwan com o limiar proposto por Casagli e Ermini (1999), pois 37,5 % dos pontos barrados analisados estão abaixo do limiar BI = 3, que indicaria que a barragem não seria formada. Assim, o limiar para as condições de Taiwan deveria apresentar um valor mais baixo.

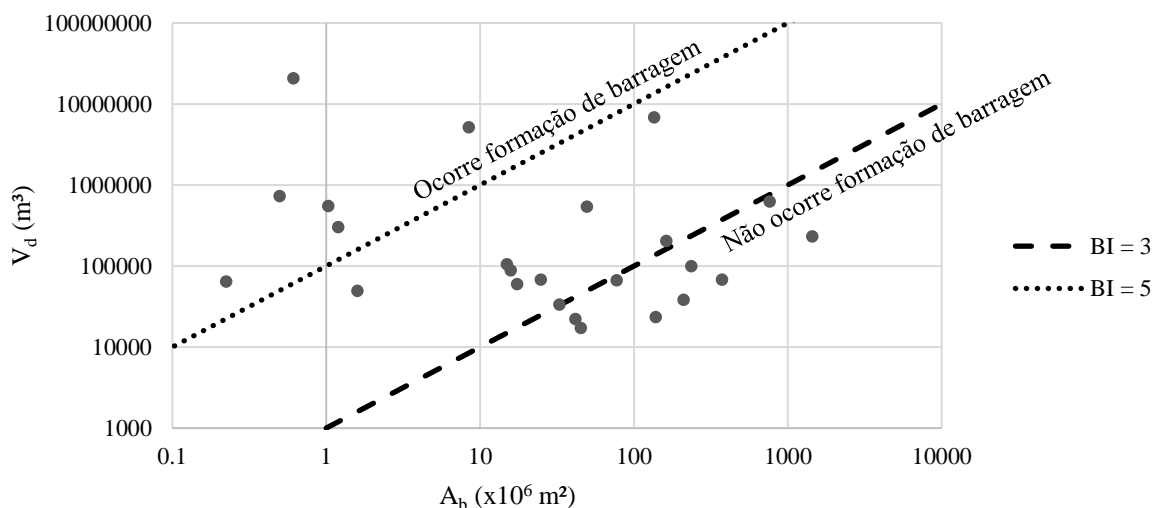


Figura 3. Aplicação do índice BI para os barramentos de Taiwan

Já o índice MOI apresentou melhores resultados, pois todos os pontos barrados apresentaram MOI maior que 3, indicando estar de acordo com as condições ambientais de Taiwan. A Figura 4 apresenta o resultado para o índice MOI.

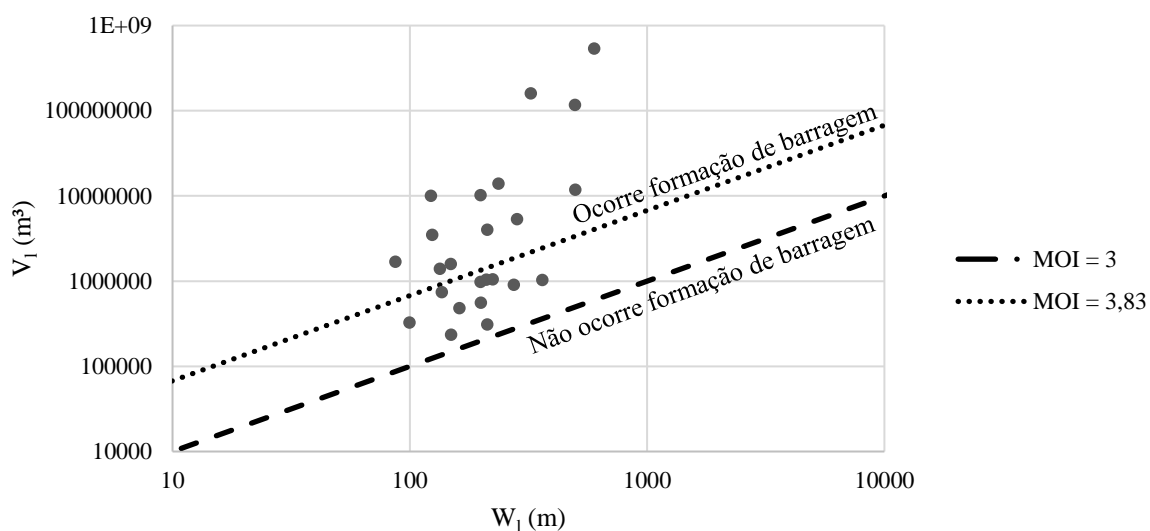


Figura 4. Aplicação do índice MOI para os barramentos de Taiwan

A seguir são apresentados outros parâmetros geomorfométricos determinados para casos com barramento (Tabela 1) e sem barramento (Tabela 2).

Tabela 1 – Parâmetros geomorfométricos para os casos de movimento de massa com barramento

Movimento de massa com barramento	A_L (m ²)	A_c (km ²)	θ para $y=10m^*$	θ para $y=15m$	θ para $y=20m$	Ângulo de entrada
1	55667	42,34	160,73	163,60	165,47	104,7
2	34954	33,00	150,02	155,61	159,31	124,9
3	61590	24,92	162,56	165,49	167,28	110
4	149377	162,47	146,74	152,29	155,56	55,3
5	38910	1,77	155,78	160,80	163,83	89,7
6	83997	211,79	147,13	154,50	159,56	42,1
7	324744	398,44	144,91	151,79	156,15	116
8	25192	489,93	156,56	161,87	165,11	145,8
9	329953	1,16	153,61	159,79	163,43	66,1
10	2487075	346,05	157,22	162,05	165,67	103,7
11	61870	372,22	160,39	165,34	167,56	73,4
12	204452	1,19	160,29	165,21	167,95	48,6
13	413071	42,95	157,98	163,49	166,65	102,1
14	87926	12,22	131,91	141,58	146,98	85,9
15	47884	1,33	144,37	151,40	155,92	86,6
16	58936	5,59	156,07	161,49	164,57	121,8
17	26267	138,95	132,91	142,14	147,89	44,6
18	76233	15,97	151,10	156,19	159,27	83,7
19	20603	45,26	139,47	149,72	156,79	125,9
20	6045884	7,03	166,08	169,45	173,02	144,1
21	1982762	8,41	166,10	169,74	172,05	110,3
22	165621	1488,11	158,95	163,41	165,59	31
23	61081	76,98	167,17	169,28	170,75	103,4

*y é a distância vertical a partir do talvegue

Tabela 2 – Parâmetros geomorfométricos para os casos de movimento de massa sem barramento

Movimento de massa sem barramento	A_L (m ²)	A_c (km ²)	θ para $y=10m$	θ para $y=15m$	θ para $y=20m$
1	42132,28	9,83	156,77	160,21	162,40
2	26373,26	2,23	146,62	153,26	157,26
3	270807,00	132,71	147,86	153,44	156,87
4	45604,92	105,80	148,45	158,54	162,54
5	18953,32	56,92	144,73	151,69	155,82
6	14404,00	18,28	161,33	164,87	166,70
7	31863,86	74,12	145,70	152,41	156,61
8	53171,73	58,31	158,75	162,30	164,61
9	195410,89	9,66	157,33	161,86	164,57
10	168410,92	12,27	148,02	154,49	158,07
11	72489,50	8,04	146,40	152,50	156,33
12	49577,32	332,59	153,67	158,01	160,36
13	30034,09	284,60	156,61	160,87	163,54
14	111951,94	780,53	172,46	173,63	174,51
15	64183,73	200,30	147,32	153,67	158,88
16	157238,21	355,71	164,53	167,55	168,97
17	55754,86	54,93	147,28	155,17	159,32
18	33043,84	113,09	146,59	154,80	159,33

A Tabela 3 indica as correlações lineares para diferentes combinações de parâmetros para os casos em que houve bloqueio do vale. É possível observar que a correlação mais forte encontrada foi para $y = 20$ m.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação linear para diferentes combinações de parâmetros

PARÂMETROS	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO
A_L e θ para $y=10$	0,43
A_L e θ para $y=15$	0,42
A_L e θ para $y=20$	0,44
A_C e A_L	0,37
A_C e Ângulo de entrada	-0,33

As correlações entre ângulo de abertura do vale e A_L podem ser consideradas positivas e fracas. O mesmo pode ser dito para a correlação de A_C e A_L . Para o ângulo de entrada e a área de contribuição, encontrou-se uma correlação linear fraca negativa. As correlações lineares entre o ângulo de entrada e o ângulo de abertura do vale foram desprezíveis (menores que 0,3).

A existência de correlações fracas e moderadas, para uma distribuição linear, indicam que existem mais fatores preponderantes na determinação da ocorrência de barramentos por escorregamentos. Dessa maneira, esses parâmetros confrontados de maneira bidimensional não são suficientes para explicar o fenômeno. Entretanto, os resultados apresentam tendências intuitivas: quanto maior a área de contribuição, maiores áreas de escorregamento e menores o ângulos de entrada requeridos para causar barramento; quanto menor o ângulo de abertura do vale, menor a área do escorregamento necessária para causar bloqueio. Essa última tendência já era percebida qualitativamente por Costa e Schuster (1988).

Apesar de não existir uma curva de tendência bem definida relacionando a abertura do vale com a área do escorregamento, a aplicação do *ISV* permitiu delinear possíveis curvas limiars. O índice foi aplicado para as distribuições de θ com $y = 20$ m. O valor do índice variou entre 5,57 e 7,62 para os movimentos de massa que geraram barramentos e entre 5,28 e 6,8 para os que não barraram.

A partir disso foi definida a curva de limiar superior, considerando o *ISV* mais alto dentre os casos que não barraram, que foi de 6,8. A curva de limiar inferior considerou o menor *ISV* dentre os que barraram, correspondente a 5,57. O gráfico com as curvas de limiars são apresentadas na Figura 5.

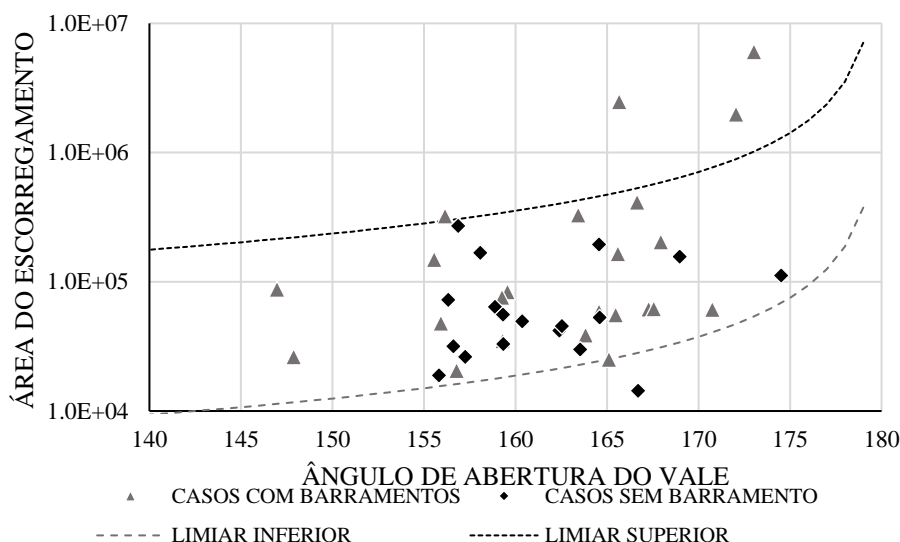


Figura 5. Limiares superiores e inferiores para o *ISV* considerando θ para $y = 20$ m

Regiões em que o *ISV* superar o valor do limiar superior indicam alta propensão ao barramento, enquanto regiões com *ISV* abaixo do valor do limiar inferior indicam baixa propensão à ocorrência. Nessa análise, 4 dos casos que barraram ficaram acima desse limiar. Assim, esse índice pode ser utilizado para avaliação preliminar de áreas propensas à barramento, mas ainda requer aplicação em outras áreas de estudo para validação adicional.

CONCLUSÕES

As principais conclusões do estudo proposto foram:

- i. Os limiares testados para índice BI não representaram de forma adequada as condições ambientais de Taiwan, enquanto que para o índice MOI, representaram;
- ii. As correlações lineares para diferentes combinações entre os parâmetros A_C , A_L , θ e ângulo de entrada do movimento de massa foram fracas;
- iii. Foram estabelecidos limiares superiores e inferiores para o índice *ISV*, com valores de 7,01 e 5,9 respectivamente;
- iv. Investigações adicionais, considerando outros parâmetros e procurando correlações não-lineares são necessários para estabelecer índices mais apropriados e confiáveis para a identificação de áreas propensas a ocorrência de bloqueio por movimentos de massa.

AGRADECIMENTOS - Este trabalho recebeu o apoio financeiro parcial da CAPES e do CNPq. Os autores agradecem também ao Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais (GPDEN) do IPH/UFRGS.

REFERÊNCIAS

ADAMS, J.E (1981). "Earthquake-dammed lakes in New Zealand". *Geology* v. 9, 215–219.

BRAUN, A.; CUOMO, S.; PETROSINO, S.; WANG, X.; ZHANG, L (2018). “Numerical SPH analysis of debris flow run-out and related river damming scenarios for a local case study in SW China”. *Landslides*, v.15, n.3, pp. 535-550.

CASAGLI N., ERMINI L (1999). “Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine”. *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, 20(3), pp. 219–249.

CHEN C.Y.; YU F.C (2011). “Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS”. *Geomorphology* 129, pp. 387–397.

CHEN, C.Y.; CHANG, J.M (2016). “Landslide dam formation susceptibility analysis based on geomorphic features”. *Landslides*, v.13, n.5, pp. 1019-1033.

CHEN, K.T.; KUO, Y.S.; SHIEH, C.L (2014). “Rapid geometry analysis for earthquake-induced and rainfall-induced landslide dams in Taiwan”. *Journal of Mountain Science*, v.11, n.2, pp.360-370.

CHEN, S.C.; HSU, C.L.; WU., T.; CHOU, H.T.; CUI, P (2011). Landslide dams induced by Typhoon Morakot and risk assessment. In: *5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Padua, Itália, 14–17 June., pp. 653–660.

CLAGUE J.J., EVANS S.G (1994). “Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera”. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 464.

COSTA, J.E., SCHUSTER, R.L., 1988 (1988). “*The formation and failure of natural dams*”. Geological Society of America Bulletin 100, pp. 1054–1068.

ERMINI, L.; CASAGLI, N (2003). Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index. *Earth surface processes and landforms*, v. 28, pp. 31–47.

JAXA/METI. (2018) “*ALOS PALSAR Radiometrically and terrain corrected GeoTIFF image*”. 2008. Obtido em ASF DAAC, acesso em: 18 de junho de 2018.

KLOSE, C (2006). “Climate and geomorphology in the uppermost geomorphic belts of the Central Mountain Range, Taiwan”. *Quaternary International*, v.147, pp.89-102.

KORUP, O (2004). “Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams”. *Engineering Geology*, v. 73, pp. 13–35.

KUO, Y.C.; LEE, M.A.; LU, M.M (2016). “Association of Taiwan’s Rainfall Patterns with Large-Scale Oceanic and Atmospheric Phenomena,” *Advances in Meteorology*, v.2016, pp.11

OTHMAN A.A., GLOAGUEN, R (2013). “River courses affected by landslides and implications for hazard assessment: a high resolution remote sensing case study in NE Iraq-W Iran”. *Remote Sensing*, v.5, pp. 1024-1044.

SASSO, S. F. D.; SOLE, A.; PASCALE, S (2014). “Assessment methodology for the prediction of landslide dam hazard”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 14, pp. 557–567.

STEFANELLI, C. T.; SEGONI, S.; CASAGLI, N.; CATANI, F (2016). “Geomorphic indexing of landslide dams evolution”. *Engineering Geology*, v. 208, pp. 1–10.

WALDER J.S., O’CONNOR J.E (1997). “Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and earthen dams”. *Water Resources Research* v. 33, pp. 2337–2348.