

O ÍNDICE DE CONECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA: UMA FERRAMENTA AUXILIAR NA GESTÃO DE RISCO DE DESASTRES NATURAIS

THE INDEX OF HYDROSEDIMENTOLOGICAL CONNECTIVITY:
AN AUXILIARY TOOL IN NATURAL DISASTER RISK MANAGEMENT

Franciele Zanandrea¹

Bruno Henrique Abatti²

Leonardo Rodolfo Paul³

Masato Kobiyama⁴

Gean Paulo Michel⁵

Introdução

A paisagem é um dos objetos principais da geografia. Quando observada por um curto período, ela pode parecer estática, mas, ao longo de escalas temporais maiores, caso pudéssemos observar, paisagens, especialmente montanhas, se modificam drasticamente de maneira que parecem estar fluindo. Diversos processos modificam a morfologia da paisagem em diferentes escalas temporais e espaciais. Há um grande e complexo conjunto de elementos que pode influenciar a dinâmica da evolução da paisagem, que envolve aspectos químicos, físicos, biológicos e antrópicos. Por conta disso, compreender como a paisagem evolui é um grande desafio científico.

A transferência de sedimentos é um dos principais processos envolvidos na evolução da paisagem. Tal processo pode se dar por diferentes agentes, como vento, água, atividades dos organismos e movimentos tectônicos. Diferentes ciências estudam cada um desses processos, por vezes individualmente, mas a sobreposição de algumas delas dá origem a novas áreas do conhecimento. A coalescência dos objetos de estudo de três ciências, a geomorfologia, a hidrologia e a sedimentologia, estabelece conceitos como a conectividade hidrossedimentológica (ZANANDREA; KOBİYAMA; MICHEL, 2017).

1 Professora, Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense (UFF), e Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4797-1379>. E-mail: franciele.zanan@gmail.com.

2 Doutorando, Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0973-4783>. E-mail: bruno.abatti@gmail.com.

3 Doutorando, Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5104-5944>. E-mail: leonardorpaul@gmail.com.

4 Professor, Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0615-9867>. E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br.

5 Professor, Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7857-1941>. E-mail: gean.michel@ufrgs.br.

A conectividade hidrossedimentológica procura compreender os processos oriundos da interação entre água, sedimentos e aspectos morfológicos do ambiente em diferentes escalas espaciais e temporais. A interação entre as formas de relevo, eventos climáticos e processos hidrossedimentológicos controla padrões de elevação, erosão, transporte e sedimentação ao longo da bacia hidrográfica. Em outras palavras, os componentes estruturais de uma região (como a morfologia, por exemplo) conduzem os processos (agentes) que os operam e vice-versa. Essa dinâmica é uma relação simultânea de escultor e matéria esculpida, na qual interagem e se modificam constantemente ao longo do tempo.

A conectividade hidrossedimentológica pode ser uma ferramenta para investigar quais são os processos chaves na dinâmica de transferência de sedimento e água na bacia, especialmente a partir da representação de limiares de conexão entre elementos da paisagem e caracterização das rotas de transporte de matéria ao longo do espaço e tempo. Esforços recentes da comunidade científica buscam compreender os aspectos físicos inerentes à conectividade, com intuito de quantificá-la e de utilizar o conceito como uma característica do sistema ao invés de um conceito exclusivamente empírico.

Atualmente, a conectividade é comumente abordada por meio de índices (WOHL et al., 2019). Os índices de conectividade procuram informar quantitativamente o grau de ligação entre diferentes compartimentos da paisagem relativos ao transporte de sedimentos. Dentre os índices existentes, o índice de conectividade hidrossedimentológica (*IHC*) é capaz de avaliar aspectos estruturais (morfologia) e funcionais (efeito de escoamento superficial, por exemplo) de maneira conjunta.

Como a conectividade hidrossedimentológica traz conhecimentos acerca da dinâmica de sedimentos, é um conceito que pode ser útil na gestão de risco de desastres provocados por eventos extremos de transporte de sedimentos, como os movimentos de massa. Os movimentos de massa são deslocamentos de matéria regidos principalmente pela força da gravidade. Dentro desse grupo, existem os escorregamentos de terra e os fluxos de detritos, que podem mobilizar grandes volumes de sedimentos e causar diversos impactos negativos à sociedade. No Brasil, esses eventos são usualmente deflagrados por precipitações extremas. Um exemplo desse tipo de desastre ocorreu recentemente em Santa Catarina (dezembro de 2020) e foi relatado por Michel et al. (2021).

O *IHC* aborda a transferência de sedimentos em eventos de diferentes magnitudes. Portanto, pode ser utilizado antes ou após a ocorrência de movimentos de massa para embasar, preliminarmente, o mapeamento das áreas perigosas e identificar regiões de interesse para a implementação de estruturas mitigadoras. Assim sendo, o objetivo deste capítulo é explorar o potencial da conectividade hidrossedimentológica como ferramenta de apoio à gestão de risco de desastres.

Contextualização

A hidrossedimentologia estuda as interações da água e dos sedimentos baseada nos pilares da hidrologia e da sedimentologia, temas muito estudados na geografia física. Os processos hidrológicos influenciam diretamente na dinâmica de sedimentos, que interfere na formação e evolução das vertentes e canais, que, por sua vez, condicionam processos hidrológicos, como o escoamento. Isso é exemplificado por Okunishi (1994) ao relatar que o fluxo de água sobre uma superfície natural provoca a movimentação das partículas de sedimentos e, conseqüentemente, alterações na topografia e rugosidade do terreno, que, por sua vez, controlam as características do fluxo de água. Resumindo, o processo modifica a forma que, por sua vez, condiciona o processo (GOERL et al., 2012).

O conceito de hidrossedimentologia é definido por Zanandrea, Kobiyama e Michel (2017) como a ciência que estuda a interação entre processos hidrológicos e processos sedimentológicos (desagregação, transporte e deposição de sedimentos) na bacia hidrográfica em diferentes escalas temporais e espaciais. A influência dessa interação na formação e evolução da paisagem e, conseqüentemente, nos processos hidrológicos é o que Goerl et al. (2012) definem como hidrogeomorfologia. Ambas as ciências estão relacionadas, pois os sedimentos e a água, foco da hidrossedimentologia, são os principais fatores que modificam a paisagem, foco da hidrogeomorfologia. No entanto, essas ciências se diferem no objeto de análise; enquanto a hidrossedimentologia centra o olhar nos processos, a hidrogeomorfologia foca na paisagem. As análises das relações entre paisagens e modelos de fluxos biofísicos estão no cerne da tradição geográfica em geomorfologia (BRIERLEY; FRYIRS; JAIN, 2006).

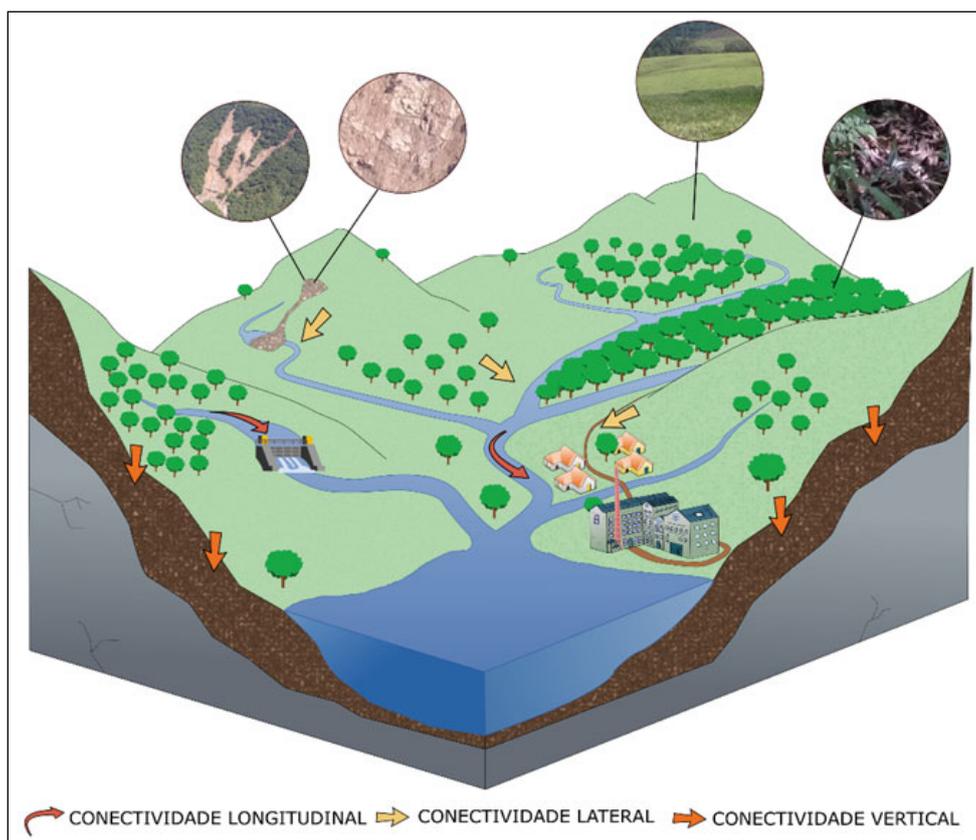
Os desastres naturais relacionados à água e aos sedimentos, como inundações e movimentos de massa, respectivamente, em uma bacia hidrográfica, dependem diretamente da dinâmica hidrossedimentológica e hidrogeomorfológica na mesma. Os processos hidrossedimentológicos em uma bacia hidrográfica são muito complexos e envolvem diversos fenômenos, que vão desde a erosão de pequenas partículas de solo e rochas até grandes movimentos de massa. Esses processos abrangem também o transporte e a deposição desse material nas calhas dos rios, lagos e reservatórios, encostas, entre outros (CARVALHO, 2008). O entendimento desses processos auxilia na identificação do alcance dos sedimentos dentro da bacia hidrográfica, bem como seus caminhos na encosta, o que pode ser útil na identificação de rotas de fluxos de detritos, por exemplo.

Uma maneira de avaliar espacialmente a dinâmica de sedimentos se dá por meio de graus de conectividade na bacia que controla a chegada dos sedimentos em locais a jusante, definida a partir das características hidrogeomorfológicas e

hidrossedimentológicas. A conectividade descreve o nível em que um sistema facilita a transferência de material (e.g. sedimento) em todos os componentes da paisagem, como encostas e redes fluviais. Quando a transferência dos sedimentos ocorre tendo a água como vetor, podemos chamar de Conectividade Hidrossedimentológica. Assim, Zanandrea, Kobiyama e Michel (2017) definiram a conectividade hidrossedimentológica como a transferência integrada de sedimentos por toda a bacia, de qualquer fonte possível para determinado ponto de controle, em um sistema em que o vetor de transporte é a água.

Os processos que determinam a conectividade hidrossedimentológica estão relacionados com a interação da estrutura geomorfológica da paisagem (BORSELLI; CASSI; TORRI, 2008; CAVALLI et al., 2013) e dos componentes da conexão, como o fluxo de energia e o vetor de transporte. Tais processos dependem também do tipo de material, controlando o comportamento do fluxo de sedimentos (PRESTON; SCHMIDT, 2003; BRACKEN et al., 2013; BRACKEN et al., 2015). De acordo com Mahoney, Fox e Aamery (2018), a (des)conectividade ocorre na bacia hidrográfica em todos os níveis morfológicos, incluindo microtopografia de superfícies onduladas de baixa energia; voçorocas, ravinas e cicatrizes de escorregamentos, sendo apenas ativas em eventos pluviométricos de alta magnitude; e planícies de inundação, que desconectam as encostas do canal.

A cobertura do solo também influencia a (des)conectividade da bacia. Persichillo et al. (2018) e Zanandrea, Michel e Kobiyama (2020a) apresentam o papel da cobertura vegetal nas encostas como zonas de retenção de sedimentos que podem causar desconexão entre uma fonte de sedimentos e o exutório da bacia. Além da paisagem natural, alterações antrópicas, como mudanças no uso do solo, construção de barragens, entre outras alterações causadas pelos usos humanos, podem influenciar na conectividade hidrossedimentológica. Relações da paisagem natural e de alterações antrópicas com a conectividade hidrossedimentológica da bacia hidrográfica são apresentadas na Figura 1.



Fonte: Zanandrea et al. (2020b).

Figura 1. Dimensões, componentes e características da conectividade hidrossedimentológica.

A Figura 1 também apresenta as dimensões da conectividade, que podem ser divididas em três tipos: (i) **Conectividade Longitudinal**, que ocorre ao longo da rede de canais por meio de suas relações de fluxo de trechos mais altos para os mais baixos e afluentes com o canal principal, refletindo a capacidade da drenagem na transferência de sedimentos; (ii) A **Conectividade Lateral**, também chamada de Transversal, refere-se à interação entre a rede de canais e a paisagem, incluindo a relação encosta-canal e planície de inundação-canal, controladas pela frequência e magnitude dos eventos de inundação e erosão (escorregamentos e fluxos de detritos); e (iii) a **Conectividade Vertical**, que se refere às interações químicas, biológicas e hidrológicas entre superfície, subsuperfície e subsolo, controladas pelas características da superfície e do solo.

Outra importante classificação da conectividade refere-se às componentes **funcionais e estruturais**. A ligação entre os elementos da paisagem, ocasionada pelo escoamento superficial e subsuperficial, refere-se à componente funcional da conectividade, o que determina a conectividade real dos sedimentos, definindo os limiares para que ocorra a conexão entre os compartimentos da bacia. Já a componente estrutural representa o potencial de transferência, e está relacionada à estrutura da paisagem determinada pelo caminho (continuidade), comprimento

da encosta e impedância (resistência) ao fluxo (BRAKEN et al., 2013). A configuração espacial dos elementos do sistema representa a conectividade estrutural, enquanto a conectividade funcional é inferida a partir da dinâmica dos processos (e.g. transferência de água e sedimentos) (WAINWRIGHT et al., 2011; HECKMANN et al., 2018), trazendo o aspecto temporal da conectividade hidrossedimentológica. Grande parte das metodologias avalia a conectividade dos sedimentos somente a partir de aspectos estruturais (geomorfológicos) que distribuem no espaço as relações entre os componentes do sistema, o que poderíamos tratar como a conectividade potencial do ambiente. No entanto, para obter a conectividade real dos sedimentos são necessárias abordagens utilizando também aspectos funcionais (hidrossedimentológicos) que trazem a dependência temporal da conectividade (BRACKEN et al., 2013; BRACKEN et al., 2015; HECKMANN et al., 2018).

A disponibilidade de sedimentos e a capacidade de distribuição ao longo da bacia hidrográfica desempenham um papel importante na avaliação dos fluxos de detritos ou dos fluxos hiperconcentrado ou de inundações bruscas com alta concentração de sedimentos e detritos, principalmente em áreas de risco (TORRESANI; D'AGOSTINO; PITON, 2021). De tal modo, a conectividade hidrossedimentológica é um conceito importante para entender melhor os processos que ocorrem na bacia hidrográfica, afetando a dinâmica da água e dos sedimentos em diferentes escalas temporais e espaciais.

A análise da conectividade dos sedimentos tem frequentemente adotado índices espaciais que permitem estimar a contribuição de uma dada parte da bacia como fonte de sedimentos, definindo os principais caminhos de transferência destes sedimentos. Muitas das aplicações e análises dos Índices de Conectividade existentes foram realizados em ambientes montanhosos, com ênfase em encostas rochosas e zonas sujeitas a escorregamentos de terra e fluxos de detritos (e.g., CAVALLI et al., 2013; PERSICILLO et al., 2018; ZANANDREA et al., 2019; CAO et al., 2021; TORRESANI; D'AGOSTINO; PITON, 2021; ZANANDREA et al., 2021).

Considerando a importância da quantificação da conectividade entre pontos da bacia, índices de conectividade podem ser ferramentas úteis no gerenciamento de desastres relacionados a sedimentos. Essas ferramentas podem indicar a possibilidade de o sedimento de uma determinada fonte atingir uma área ou a rede de drenagem, seja este proveniente de erosão superficial ou até de movimentos de massa. Portanto, avaliar as fontes de sedimentos e os processos de transferência de água e sedimentos é uma etapa crucial para planejar medidas estruturais e não estruturais adequadas na redução de riscos de desastres.

Índice de Conectividade Hidrossedimentológica

Tendo a perspectiva da conectividade hidrossedimentológica como um processo chave da dinâmica de sedimentos, atualmente há um grande interesse de representar de maneira quantitativa a conectividade. Inúmeras metodologias buscam responder onde, como e quando ocorrem os processos de ligação entre compartimentos da bacia. Nesse contexto, índices de conectividade vêm se destacando por serem de fácil aplicação e oferecerem informações semiquantitativas de maneira espacializada do grau de conectividade de um ponto, feição ou elemento da paisagem, com um local de interesse.

De forma prática, índices de conectividade consistem em uma combinação de variáveis conceitualmente conhecidas por controlarem a organização espacial e de transferência de sedimentos ao longo da paisagem. Devido ao fato de os índices serem elaborados por fatores que teoricamente influenciam na conectividade, estes também podem ser denominados como modelos conceituais de conectividade de sedimentos (HECKMANN et al., 2018). O principal objetivo dos índices de conectividade é exibir o potencial de conexão existente entre fontes e rotas de sedimentos (áreas erodidas, regiões de agricultura e estradas, por exemplo) com regiões de interesse (lagos, canais, barramentos, exutório da bacia hidrográfica).

Entre os inúmeros índices de conectividade elaborados no mundo, destaca-se o desenvolvido por Borselli et al. (2008). O índice de conectividade (*IC*) proposto por esses autores impulsionou a aplicação do conceito de conectividade como ferramenta de manejo e controle de sedimentos em bacias hidrográficas. Devido à frequente aplicação desse índice, vários autores buscaram aprimorá-lo, ao mesmo tempo que verificam resultados relevantes com a sua aplicação (e.g., CAVALLI et al., 2013; GAY et al., 2015; CHARTIN et al., 2016; LIZAGA et al., 2017; KALANTARI et al., 2017; ZANANDREA et al., 2020a).

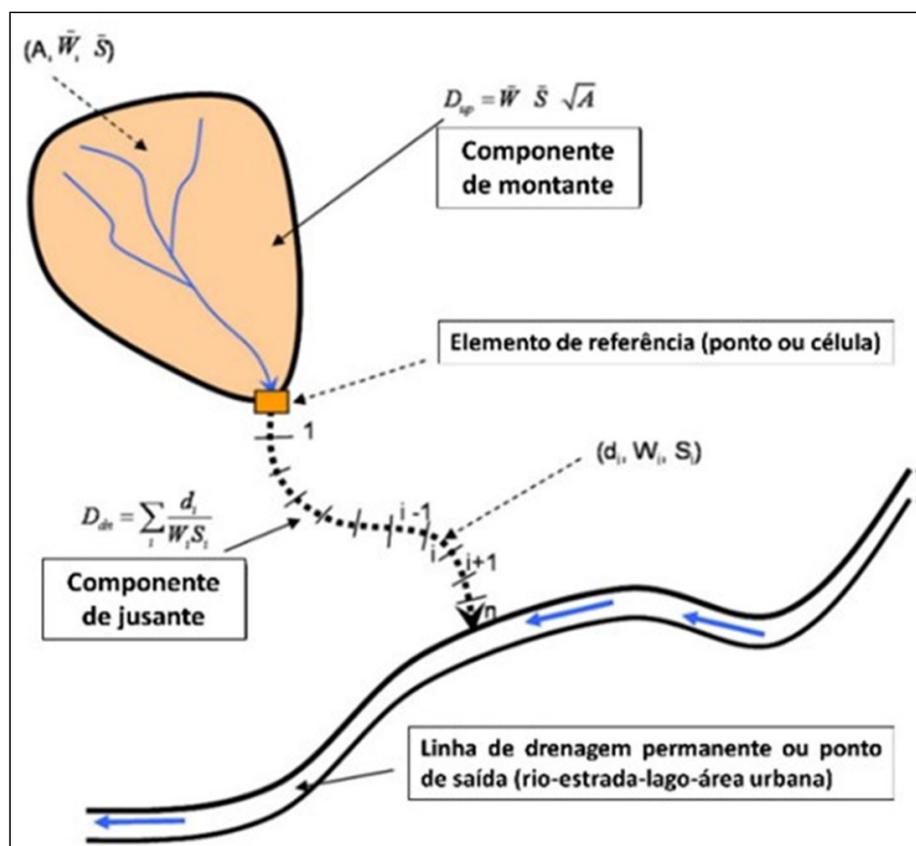
O *IC* determina, em escala de pixel, o grau de conectividade de um determinado ponto de acordo com áreas deposicionais, canais e o exutório da bacia hidrográfica. O cálculo do *IC* considera as características da área de contribuição, denominada componente a montante (D_{up}), e características do caminho de fluxo a ser percorrido pelo sedimento até o ponto de interesse, denominado componente de jusante (D_{dn}).

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) = \log_{10} \left(\frac{W \cdot S \cdot \sqrt{A}}{\sum \frac{d_i}{W_i \cdot S_i}} \right) \quad (1)$$

em que *W* é o fator de impedância; *S* a declividade (m/m); *A* é a área de contribuição (m²) e *d* o comprimento do caminho de fluxo de cada pixel (m), sendo o *IC*

adimensional. Dessa maneira, a conectividade de cada ponto (nesse caso, o pixel ou célula) é estimada a partir da ponderação das variáveis a montante e a jusante.

A Figura 2 exibe a concepção do IC e quais as variáveis consideradas para determinar o potencial de conexão de um ponto até a região de interesse.



Fonte: Adaptado de Borselli et al. (2008).

Figura 2. Esquema conceitual do índice de conectividade (IC).

O cálculo é realizado em ambiente SIG a partir do algoritmo apresentado por Crema e Cavalli (2017). Os resultados são expressos em escala de pixel com valores no intervalo de $[-\infty, +\infty]$, em que, quanto maior for o valor obtido no índice de conectividade maior é o grau de conectividade naquele pixel. O IC estima exclusivamente a conectividade estrutural, descrevendo a conectividade a partir das características e configurações das feições geomorfológicas da paisagem.

A conectividade é extremamente condicionada por fatores estruturais, como, por exemplo, as rotas de transporte de sedimentos que são determinadas principalmente por características topográficas, como declividade e rugosidade da superfície. Contudo, as estruturas da paisagem estão continuamente sendo influenciadas pela conectividade funcional, em que ela determina o quanto e quando a paisagem estabelece conexões entre seus compartimentos. Posto isso, abordagens exclusivamente estruturais não consideram inúmeros processos e fatores que influenciam a conectividade hidrossedimentológica.

Tendo em vista que o *IC* desenvolvido por Borselli et al. (2008) não compreende a conectividade funcional, Zanandrea et al. (2021) aprimoraram o *IC*, propondo um novo índice. Os autores consideraram a dinâmica da água na representação da conectividade de sedimentos e, por consequência, agregaram temporalidade à estimativa do grau de conectividade. O novo índice proposto, denominado Índice de Conectividade Hidrossedimentológica (*Index of Hydrosedimentologic Connectivity – IHC*), é capaz de avaliar as variações espaço-temporais da conectividade hidrossedimentológica em escala de eventos, levando em consideração eventos antecedentes, características da precipitação e escoamento superficial.

A aplicação do *IHC* também é realizada em ambiente SIG, onde a ferramenta foi implementada a partir do *Model Builder* presente no ArcGIS 10.3 (ESRI, 2015). A caixa de ferramentas foi elaborada a partir do algoritmo proposto por Crema e Cavalli (2018) e se utiliza das funcionalidades disponíveis na ferramenta TauDEM 5.3 (TARBOTON, 2021). O *IHC* é definido como:

$$IHC = \left(\frac{\overline{W_{RS}} \cdot \bar{S} \cdot Ips \cdot \sum Q_{runoff}}{\sum \frac{d_i}{W_{RS_i} \cdot S_i}} \right) \quad (2)$$

em que W_{RS} representa a impedância; S a declividade; Ips o índice de precipitação para sedimentos (adimensional); Q_{runoff} o escoamento superficial (m) acumulado da área de drenagem a montante do pixel calculado; e d_i a distância do pixel até o ponto de interesse.

O fator de impedância (W_{RS}) representa a resistência ao escoamento promovida pela superfície. O W_{RS} é determinado com base no coeficiente de rugosidade de Manning (n), em que o índice *RS – relative smoothnes* ou suavidade relativa - é dado por:

$$RS = \frac{n_{min}}{n} \quad (3)$$

em que n_{min} é o menor valor de Manning tabelado, podendo ser adotado o valor de 0,01 com base em Chow (1959). Anteriormente, as metodologias para determinação da impedância possuíam dificuldade de representar os efeitos de regiões montanhosas com cobertura de florestas, enquanto o W_{RS} se mostrou vantajoso nessas regiões (Zanandrea et al., 2020).

Além do W_{RS} , há a metodologia do *IC* original, que usa o fator C da USLE/RUSLE, proposto por Wischmeier e Smith (1978) e Renard et al. (1997), e a metodologia de Cavalli et al. (2013), que utiliza o próprio modelo digital de terreno para determinar a impedância com base na rugosidade superficial (*roughness index – RI*). Ambas as metodologias também estão disponíveis na caixa de ferramentas do *IHC*.

Para o cálculo do volume de escoamento superficial (Q_{runoff}), utiliza-se o método SCS Runoff Curve Number (NRCS, 1972) em escala de pixel.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (5)$$

$$Q_{runoff} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{quando } P > I_a, \text{ ou } Q_{runoff} = 0 \quad (6)$$

em que P é a precipitação total do evento (mm); S é o parâmetro de armazenamento (mm); e I_a é a abstração inicial (mm). O valor de S varia espacialmente em relação às características do solo e uso da terra através do valor de CN (*curve number*).

A adição do escoamento superficial ao índice estabelece escala temporal de evento à conectividade hidrossedimentológica. Ao mesmo tempo, evidencia as fontes variáveis de sedimentos e caminhos preferenciais de fluxo de acordo com as características da precipitação.

A inclusão do Ips traz uma ponderação em relação à quantidade de sedimento que ficou disponível no evento anterior para ser conectado durante o evento analisado. O Ips pode ser calculado para qualquer evento de precipitação antecedente especificado:

$$Ips(n) = \frac{Imax_{m-o}}{\sum_{i=1}^o \frac{V_{m-i}}{\Delta t_{m-i}}} \quad (7)$$

em que $Imax_{m-o}$ é a intensidade máxima do evento antecedente $m-o$ (mm.d⁻¹); o é o número de eventos antecedentes utilizado no índice; V_{m-i} é a precipitação acumulada no evento antecedente $m-i$ (mm); Δt_{m-i} é a duração do evento de precipitação $m-i$ (d). Admite-se que, quanto maior a intensidade do evento de precipitação antecedente, maior a quantidade de sedimentos disponíveis. Ao mesmo tempo que, quanto maior o escoamento total da precipitação antecedente, menor a quantidade de sedimentos disponíveis para o transporte no evento seguinte.

A aplicação do IHC segue as mesmas premissas que o índice desenvolvido por Borselli et al. (2008), calculado a partir de informações matriciais de todas as variáveis consideradas e, com essas informações, se determina o grau de

conectividade em cada ponto. Além disso, essa ferramenta foi desenvolvida com o intuito de ser facilmente aplicável, sendo útil no gerenciamento de desastres relacionados a sedimentos e na identificação de áreas potencialmente suscetíveis a processos erosivos e seus caminhos de fluxo.

Aplicação do IHC: estudo de caso do desastre de 2017 na bacia hidrográfica do rio Mascarada

O IHC foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Mascarada, cabeceira da bacia hidrográfica do rio dos Sinos, uma das mais importantes bacias do estado do Rio Grande do Sul. A bacia hidrográfica do rio dos Sinos abrange 32 municípios em uma área de aproximadamente 3.820 km², tendo uma população de cerca de 1,3 milhões de habitantes, segundo o Censo de 2010 do IBGE. Já a bacia hidrográfica do rio Mascarada possui 320 km² de área de drenagem, distribuídos entre os municípios de São Francisco de Paula, Riozinho e Rolante. Essa bacia é responsável pela produção e manutenção da quantidade e qualidade da água que abastece os municípios de jusante (Figura 3).

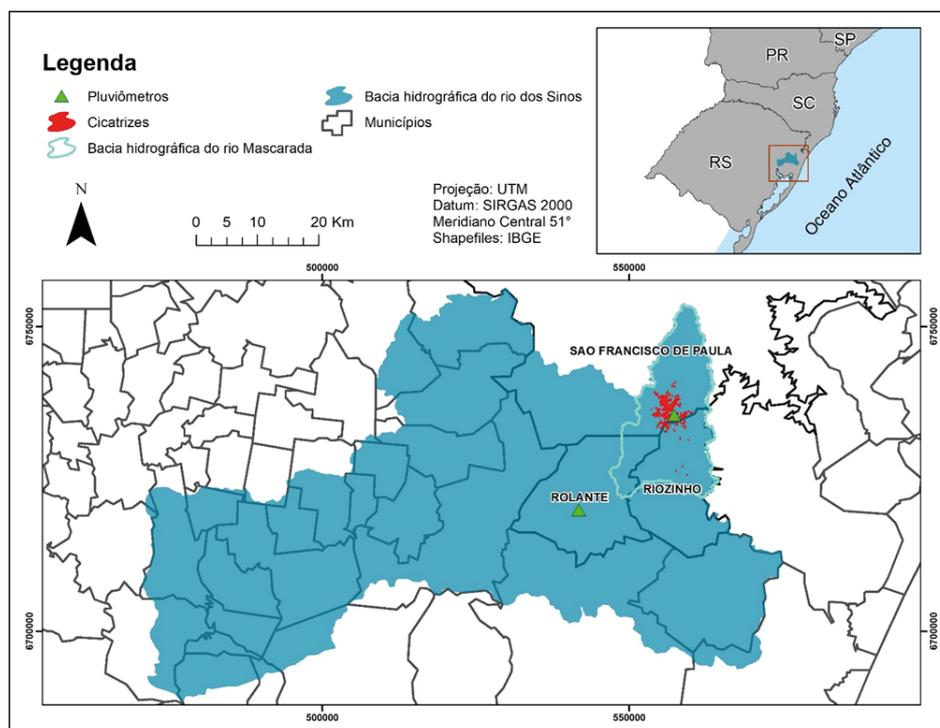
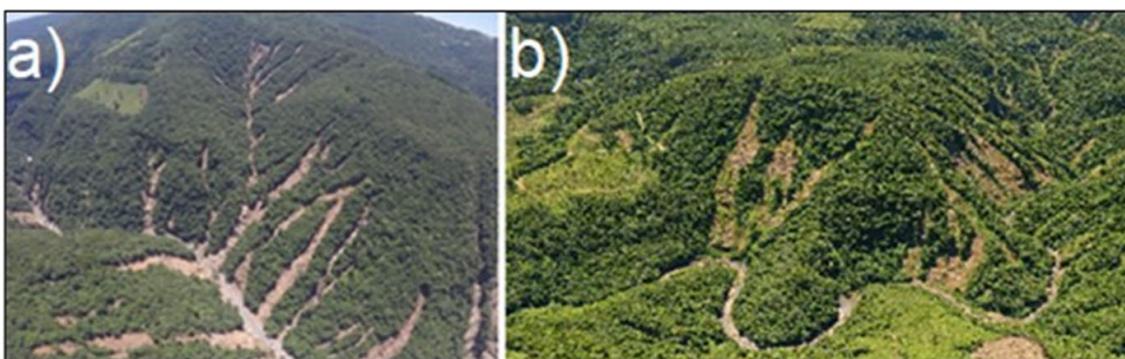


Figura 3. Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Mascarada, pluviômetros e cicatrizes de escorregamentos.

As encostas da bacia possuem altas declividades, chegando a apresentar inclinações próximas de 70 graus. A paisagem dissecada das escarpas em conjunto à baixa profundidade do solo da região proporciona um ambiente de instabilidade geomorfológica. Somada a condição natural de instabilidade geomorfológica, a

região conta com um dos maiores totais precipitados do estado, atingindo valores anuais superiores a 2000 mm (GPDEN/SEMA, 2017), o que torna essa região suscetível a movimentos de massa. Já as regiões próximas à foz apresentam extensas planícies, onde se localiza o município de Rolante, revelando diversos pontos de deposição de materiais (rochas, solos e troncos) dessas encostas.

No dia 5 de janeiro de 2017, as cabeceiras da bacia foram afetadas por uma chuva intensa e localizada que deflagrou centenas de escorregamentos de terra nas encostas (Figura 4), que alcançaram a porção a jusante da bacia, ocasionando uma inundação com alta concentração de sedimentos. Isso ocorreu, pois grande parte dos escorregamentos de terra se conectou com o canal principal e foi transportado até as planícies da bacia. O desastre ocorrido afetou cerca de 6,6 mil pessoas e 70% do território do município de Rolante, felizmente não houve nenhum óbito segundo a prefeitura do município (CARDOZO et al., 2021).



Fonte: CARDOZO et al., 2021.

Figura 4. Cicatrizes de escorregamentos de terra e fluxo de detritos ocasionados pelo evento de 2017 nas encostas da bacia do rio Mascarada/RS em a) 2017 e b) 2019.

Em 2017, a área afetada não possuía monitoramento a partir de postos pluviométricos oficiais e, como estas chuvas ocorreram de forma concentrada, não existem dados oficiais medidos do evento. No entanto, segundo o levantamento realizado pelo GPDEN/SEMA (2017), foram registrados volumes de chuva variando entre 100 mm e 272 mm em poucas horas nos pluviômetros não-oficiais de agricultores locais. Observa-se que a média mensal para o mês de janeiro na região é de aproximadamente 180 mm.

Considerando a magnitude do evento citado, aplicou-se o *IHC* para a bacia hidrográfica do rio Mascarada considerando os dados deste evento. Para obtenção dos parâmetros topográficos necessários no cálculo de *IHC*, referentes à conectividade estrutural da paisagem, foi utilizado um Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 1x1 m de tamanho de célula. O fator de impedância *W* utilizado foi o *RS* obtido a partir de mapas de uso do solo. Os valores de *RS* definidos foram os

mesmos apresentados em Zanandrea et al. (2020a), que avaliaram a influência do uso de diferentes W no cálculo de IC para a bacia hidrográfica do rio Mascarada, onde o uso de RS apresentou melhor aplicação para a mesma área de estudo.

Os dados de precipitação utilizados para o cálculo do escoamento superficial (SCS/CN) foram obtidos em dois pontos, distribuídos espacialmente a partir do método dos Polígonos de Thiessen, atribuindo um valor de Q_{runoff} para cada pixel conforme o polígono em que se encontra. Foram utilizados os dados medidos por um pluviômetro não oficial ($P_{total} = 272$ mm) no local onde ocorreram os escorregamentos (Figura 3). Já para a parte baixa da bacia, foram utilizados os dados de uma estação automática ($P_{total} = 66$ mm) fora dos limites da bacia do rio Mascarada, no município de Riozinho/RS, localizada próximo ao exutório da bacia. O valor de lps foi considerado igual a 3 para ambas as estações devido à falta de dados de precipitação antecedente ao evento na porção superior da bacia.

Os valores de CN também foram definidos para cada pixel com base no mapa de uso do solo (ZANANDREA et al., 2020a) e na pedologia da região (DÜMIG et al., 2008). Os valores foram definidos conforme NRCS (1972) e não foram consideradas as condições antecedentes de umidade do solo, apenas seu grupo hidrológico. Assim, calculou-se o escoamento superficial de cada célula para cada evento, gerando um mapa espacializado de Q_{runoff} para a bacia de estudo. Consideramos um valor mínimo de Q_{runoff} de 0,0001 mm para evitar erros computacionais.

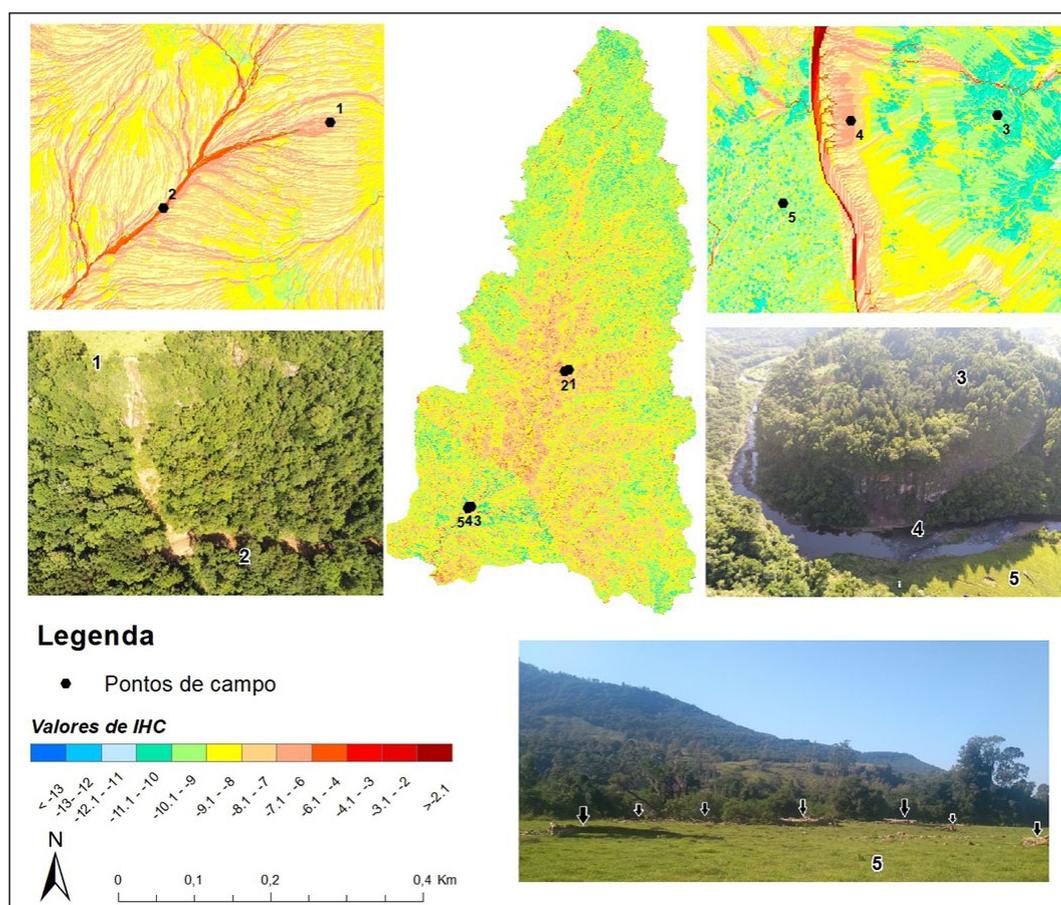
Foram realizadas campanhas em campo com o intuito de averiguar *in situ* os locais que apresentaram maiores e menores valores de IHC para validação do índice, levantando locais de deposição e transferência de sedimentos ao longo da bacia. Utilizou-se também um inventário de cicatrizes de escorregamentos e fluxos de detritos ocorridos em 2017 obtido por fotointerpretação e pesquisas de campo (ZANANDREA et al., 2019). Esse inventário detalhado mostra claramente que a maioria dos escorregamentos é conectada aos canais, e sabe-se que os sedimentos gerados nesse evento atingiram o exutório da bacia de estudo, ocasionando uma inundação com alta concentração de sedimentos e detritos na cidade a jusante.

O evento ocorrido em 2017 teve uma precipitação média de 240 mm na bacia hidrográfica do rio Mascarada, porém grande parte dessa precipitação atingiu apenas a parte superior nordeste da bacia hidrográfica. O valor médio de IHC foi de -8.5, principalmente devido ao baixo valor de lps , ou seja, pouca chuva antecedente, ocasionando menos sedimento disponível para ser transportado superficialmente, no entanto esse evento gerou grande disponibilização de sedimentos devido aos escorregamentos de terra e aos fluxos de detritos. Ainda assim, os fluxos de detritos foram bem identificados pelo IHC (Figura 5). Essas cicatrizes de fluxos de detritos com áreas de solo exposto estão localizadas em encostas íngremes e são consideradas *hotspots*, ou seja, funcionam como locais de fontes de sedimentos,

gerando escoamento rápido que desencadeia erosão no caminho imediatamente a jusante (MARCHAMALO et al., 2016; MISRHA et al., 2019).

A verificação do evento foi realizada qualitativamente por meio de interpretação visual, observando que as cicatrizes de fluxo de detritos correspondem a caminhos de fluxo com valores mais altos no mapa de conectividade (pontos 1 e 2 na Figura 5) e a áreas de deposição com valores mais baixos (ponto 5 na Figura 5). Na região média da bacia (pontos 1 e 2 na Figura 5), foram observados grandes fluxos de detritos ao longo da encosta íngreme que chegaram até o canal principal, manifestando altos valores *IHC* nesses locais (*IHC* entre -4.2 e -5.2). A presença de depósitos de sedimentos ao longo do canal mostra a conexão dos fluxos de detritos da porção superior da bacia com as regiões mais baixas, fornecendo suprimento de sedimentos para serem transportados no canal (ponto 4 na Figura 5).

Também, em algumas áreas que apresentaram valores mais baixos de conectividade (*IHC* entre -10,5 e -9,5), foram encontradas evidências em campo, como detritos lenhosos e sedimentos grosseiros (ponto 5 na Figura 5), de que essas regiões funcionaram como áreas de depósitos durante o evento, desconectando-se do exutório da bacia.



Fonte: Adaptado de Zanandrea et al. (2021).

Figura 5. Mapa de *IHC* do Evento de 2017 ($P_{média} = 240\text{mm}$) onde ocorreram diversos escorregamentos e fluxos de detritos em 2017.

Retrata-se que o mapa de *IHC* concorda com os dados de campo e teve boa representação nos padrões indicativos de sedimentos, como caminhos reais de transporte de sedimentos e área de depósitos de detritos na bacia durante o evento de 05 de janeiro de 2017. O mapa de *IHC* permitiu identificar áreas de transferência e deposição de sedimentos, demonstrando coerência com o evento extremo, identificando de maneira satisfatória os escorregamentos e fluxo de detritos, bem como áreas de deposição.

Considerações Finais

A conectividade hidrossedimentológica é um importante conceito no gerenciamento de recursos hídricos e desastres de origem hídrica, pois auxilia no entendimento da dinâmica de água e sedimentos em bacias hidrográficas. O *IHC* permite avaliar a variação da conectividade ao longo do tempo sob diferentes eventos de precipitação, espacializados de acordo com a área atingida pela chuva e com as características da paisagem. A geração de escoamento superficial espacialmente distribuída permite observar os locais e em quais eventos de precipitação determinada região ficou mais conectada com um ponto de interesse (e.g. reservatório, exutório, entre outros). Desse modo, o índice é capaz de estimar a variação espaço-temporal da conectividade hidrossedimentológica de uma bacia hidrográfica, identificando locais de transferência e deposição de sedimentos para eventos de diferentes magnitudes.

Em regiões sujeitas a movimentos de massa, como fluxo de detritos, o *IHC* auxilia fornecendo uma base razoável para o zoneamento de perigo e de projetos estruturais de mitigação (e.g. *sabo dam*) considerando os principais caminhos de fluxo e seu alcance na paisagem. Por ser uma ferramenta simples e com dados de entrada de fácil obtenção, o *IHC* pode ser um recurso auxiliar na avaliação preliminar pré e pós desastre, auxiliando na identificação de potenciais rotas e locais afetados. O índice é de livre acesso⁶, e seu guia de aplicação foi desenvolvido por Zanandrea et al. (2021).

No entanto, para melhorar a precisão da avaliação, mais fatores-chave que afetam a transferência de sedimentos devem ser levados em consideração, uma vez que o *IHC* possui algumas limitações. A avaliação da conectividade a partir do *IHC* considera parâmetros adimensionais. Outra limitação é que o índice considera a seleção de diferentes valores tabelados (e.g. *n* e *CN*) que dependem altamente da escolha do usuário, o que traz subjetividade à avaliação. Porém, se bem definidos os parâmetros de entrada, o *IHC* traz importantes indícios de locais de maior e menor conectividade e de limiares de precipitação para que ocorra (des)conectividade de algumas áreas, o que pode ser de grande utilidade para o gerenciamento de bacias hidrográficas.

Nota

6 Disponível em: <https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/?page_id=1830>.

Referências

- BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; JAIN, V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. **Area**, v. 38, n. 2, p. 165-174, 2006.
- BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 268-277, nov. 2008.
- BRACKEN, L.; TURBBULL, L.; WAINWRIGHT, J.; BOGAART, P. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transport at multiple scales. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, p. 177 – 188, ago. 2015.
- BRACKEN, L. J.; WAINWRIGHT, J.; ALI, G. A.; TETZLAFF, D.; SMITH, M. W.; REANEY, S. M.; ROY, A. G. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. **Earth-science Reviews**, v. 119, p. 17 – 34, 2013.
- CAO, C.; ZHANG, W.; CHEN, J.; SHAN, B.; SONG, S.; ZHAN, J. Quantitative estimation of debris flow source materials by integrating multi-source data: A case study. **Engineering Geology**, v. 291, p. 10622, jun. 2021.
- CARDOZO, G.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M. Inventário de movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Mascarada/RS. **Ciência e Natura**, v. 43 (31), p. 1 – 26, 2021.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 600 p.
- CAVALLI, M.; TREVISANI, S.; COMITI, F.; MARCHI, L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. **Geomorphology**, v. 188, p. 31 – 41, 2013.
- CHARTIN, C.; EVRARD, O.; LACEBY, J. P.; ONDA, Y.; OTTLÉ, C.; LEFÈVRE, I.; CERDAN, O. The impact of typhoons on sediment connectivity: lessons learnt from contaminated coastal catchments of the Fukushima prefecture (Japan). **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.L.], v. 42, n. 2, p. 306-317, 2016.
- CREMA, S.; CAVALLI, M. SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. **Computers & Geosciences**, [S.L.], v. 111, p. 39-45, 2018.
- DÜMIG, A.; SCHAD P.; KOHOK M.; BEYERLEIN P.; SCHWIMMER W.; KÖGEL-KNABNER I. A mosaic of nonallophanic Andosols, Umbrisols and Cambisols on rhyodacite in the southern Brazilian highlands. **Geoderma**, v. 145, p. 158-173, 2008.
- ESRI. 2015. **ArcGis 10.3**. Environmental System Research Institute, Inc,

Redlands, CA, 2015.

GAY, A.; CERDAN, O.; MARDHEL, V.; DESMET, M. Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. **Journal of Soils and Sediments**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 280-293, 2015.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M.; SANTOS, I. dos. Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 103 – 111, 2012.

GPDEN/SEMA- Rio Grande Do Sul. **Diagnóstico preliminar**. Porto Alegre: DRH/SEMA, 2017. 26p. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2020/07/DRH-GPDEN-2017-Diagnostico-preliminar-de-Rolante.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2021.

HECKMANN, T.; CAVALLI, M.; CERDAN, O.; FOERSTER, S.; JAVAUX, M.; LODÉ, E.; SMETANOVÁ, A.; VERICAT, D.; BRARDINONI, F. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. **Earth Science Reviews**. v. 187, p. 77–108, dez. 2018.

LIZAGA, I.; QUIJANO, L.; PALAZÓN, L.; GASPARG, L.; NAVAS, Ana. Enhancing Connectivity Index to Assess the Effects of Land Use Changes in a Mediterranean Catchment. **Land Degradation & Development**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 663-675, 2017.

KALANTARI, Z.; FERREIRA, C S.; KOUTSOURIS, A. J.; AHLMER, A.; CERDÀ, A.; DESTOUNI, G. Assessing flood probability for transportation infrastructure based on catchment characteristics, sediment connectivity and remotely sensed soil moisture. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 661, p. 393-406, 2019

MAHONEY, D. T.; FOX, J. F.; AAMERY, N. A. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 862-883, 2018.

MARCHAMALO, M.; HOOKE, J.M.; SANDERCOCK, P.J. Flow and sediment connectivity in semi-arid landscapes in SE Spain: patterns and controls. **Land Degradation & Development**, v. 27, p. 1032–1044, 2016.

MICHEL, G.P.; SCHWARZ, H.; ABATTI, B.H.; PAUL, L.R.; SILVA, M.A.; ZANANDREA, F.; SALVADOR, C.G.; CENSI, G.; BIEHL, A.; KOBİYAMA, M. **Relatório técnico dos desastres de dezembro de 2020 nos municípios de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul – SC. Volume I**. Porto Alegre: GPDEN/IPH/UFRGS, 2021. 53 p. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2021/01/Relatorio-Desastre-do-Alto-Vale-do-Itajai-Dezembro-de-2020.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2022.

MISHRA, K.; SINHA, R.; JAINB, V.; NEPAL, S.; UDDIN, K. Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin. **Science of the Total Environment**, v. 661, p. 251-265, 2019.

NRCS – Natural Resource Conservation Service. “**Hydrology**.” National engineering

- handbook, Sec. 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C, 1972.
- OKUNISHI, K. Hydrogeomorphological interactions: A review of approach and strategy. **Transactions, Japanese Geomorphological Union**, v. 12, p. 99-116, 1991.
- PERSICHILLO, M.G.; BORDONI, M.; CAVALLI, M.; CREMA, S.; MEISINA, C. The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. **Catena**, v.160, p. 261–274, jan. 2018.
- PRESTON, N.; SCHMIDT, J. Modelling sediment fluxes at large spatial and temporal scales. 2003. In: A. Lang; K. Henrich and R. Dikau (eds) **Long Term Hillslope and Fluvial System Modelling – Concepts and Case Studies from the Rhine River Catchment**, Berlin: Springer, 2013. p. 53 – 72, (Lecture Notes in Earth Sciences v. 100)
- RENARD, K. G.; FOSTER, G.R; WEESIES, D.K.; YODER, D.C Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: **Agriculture Handbook 703**. Washington: USDA, 1997.
- TARBOTON, D.G. **Taudem 5.3**, Terrain Analysis Using Digital Elevation Models [online] Disponível em: <<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>>. 2021.
- TORRESANI, L.; D'AGOSTINO, V.; PITON, G. Deciphering sediment Connectivity Index and erosion pattern in a debris flow catchment. 14th INTERPRAEVENT Congress: **Natural hazards in a changing world, International Research Society INTERPRAEVENT**, Bergen (virtual), Norway, may 2021, p.303-311.
- WAINWRIGHT, J.; TURNBULL, L.; IBRAHIM, T. G.; LEXARTZA-ARTZA, I.; THORNTON, S. F.; BRAZIER, R. E. Linking environmental regimes, space and time: interpretations of structural and functional connectivity. **Geomorphology**, v.126, p. 387 – 404, mar. 2011.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. In: Agriculture Handbook 537. Brooksville, FL: **Science and Education Administration**, US Department of Agriculture - Agricultural Research Service, 1978.
- WOHL, E.; BRIERLEY, G.; CADOL, D.; COULTHARD, T.J.; COVINO, T.; FRYIRS, K.A.; GRANT, G.; HILTON, R.G.; LANE, S.N.; MAGILLIGAN, F.J.; MEITZEN, K.M.; PASSALACQUA, P.; POEPPL, R.E.; RATHBURN, S.L.; SKLAR, L.S. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.44, p. 4-26, 2019.
- ZANANDREA, F.; KOBAYAMA, M.; MICHEL, G. P. Conectividade hidrossedimentológica: uma abordagem conceitual. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXII, 2017, Florianópolis. **Anais ...**. Florianópolis: ABRHidro, 2017. p. 1-8.
- ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M.; CARDOZO, G. L. Evaluation of different DTMs in sediment connectivity determination in the Mascarada River

Watershed, southern Brazil. **Geomorphology**, v. 332, p. 80 – 87, mai. 2019.

ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M. Impedance influence on the index of sediment connectivity in a forested mountainous catchment.

Geomorphology, v. 351, p. 106962, fev. 2020a.

ZANANDREA, F.; PAUL, L.R.; MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; ZANINI, A.S.; ABATTI, B.H. Conectividade dos sedimentos: conceitos, princípios e aplicações.

Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 21, n.2, p. 435-459, 2020b.

ZANANDREA, F.; MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M.; CENSI, G.; ABATTI, B.H. Spatial-temporal assessment of water and sediment connectivity through modified connectivity index in a subtropical mountainous catchment. **Catena**, v. 204, p. 105380, 2021.



Autor: © Mardilson Torres (Bujari-Acre-BR)